



Universidad
Carlos III de Madrid

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

**IMPLEMENTACIÓN SOBRE SUSTRATO
FLEXIBLE DE UN SISTEMA DE
ADQUISICIÓN DE DATOS ANALÓGICOS Y
ENVÍO MEDIANTE BUS CAN.**

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Autor: Ismael Sánchez Solano

Tutores: Antonio Flores Caballero
M^a Dolores Blanco Rojas



Universidad
Carlos III de Madrid

*Implementación sobre sustrato flexible de un
sistema de adquisición de datos analógicos
y envío mediante bus CAN*



AGRADECIMIENTOS

Este documento supone el fin de una etapa. Etapa que ha estado llena de aprendizajes, sacrificios, frustraciones y triunfos, por eso quiero agradecer a todas la personas que han sido partícipes de ella.

En primer lugar a la familia Sánchez Solano, no solo por apoyarme y estar cuando se le necesita, si no por inculcarme que el sacrificio merece recompensas, que la madurez es independiente de la edad, y que cualquier error se puede solventar y aprender de él. En definitiva, por enseñarme a valerme por mi mismo, ser independiente y que se puede conseguir lo que uno se proponga, pero que en los momentos duros tener una familia unida marca la diferencia.

A mi núcleo por enseñarme que personas diferente, con distintos puntos de vista y formas de entender las situaciones, pueden formar un núcleo homogéneo y difícil de disociar.

A mis compañeros de la universidad, que sin duda alguna, son lo que mejor entiende el significado de estudiar una ingeniería en la UC3M. En especial, al grupo de electrónica bilingüe por el apoyo y la colaboración que ha existido entre todos, y en concreto a las personas de este grupo que han dejado de ser compañeros para convertirse en amigos.

A mis amigos, los cercanos, y aquellos que aun estando lejos, son más cercanos que muchas familias.

A mis compañeros del Arroyo, porque durante cinco años trabajando con ellos, me han enseñado que el tener estudios implica mucho más que aspirar a un buen trabajo, y que se puede compaginar estudios, trabajo y vida personal, siendo cercano con el entorno.

A mis compañeros de Corea del Sur, por las experiencias vividas.

A mi tutor Antonio Flores Caballero por su ayuda en el desarrollo de este trabajo de fin de grado, y mi compañera Tamara Trillo Gómez por las interminables tardes en el aula de ordenadores.

Y por último al departamento de Hardware de Sistem SA, por confiar en mí, pese a no tener los estudios acabados y pese a mi escasa experiencia en el sector. Por ayudarme a hacer que la electrónica pase de ser un *hobby* a una profesión. Y porque el fin de esta etapa implica el principio de una nueva con ellos.

A todos ellos, gracias.

Contenido

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	6
1.1 Motivación.....	6
1.2 Objetivos	7
1.3 Recursos utilizados.....	7
1.4 Tareas a desarrollar y planificación	8
1.5 Estructura del documento.....	10
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	11
2.1 Circuitos impresos Flexibles.....	11
2.1.1 HISTORIA.....	12
2.1.2 ESTRUCTURA DE LOS CIRCUITOS FLEXIBLES	13
2.1.3 TIPOS DE CIRCUITOS FLEXIBLES	16
2.1.4 PROCESOS DE FABRICACIÓN	20
2.1.5 SCREEN-PRINTING	23
2.1.6 VENTAJAS.....	24
2.1.7 APLICACIONES	26
2.2 Tecnología vestible.....	28
CAPÍTULO 3: ESPECIFICACIONES DE CIRCUITO	30
3.1 Diagrama de bloques.....	30
3.2 Componentes del circuito	31
3.2.1 MICROCONTROLADOR STM32F103C8T6.....	32
3.2.2 OSCILADOR.....	37
3.2.3 REGULADOR	39
3.2.4 DESACOPLO	41
3.2.5 DIVISOR DE TENSIÓN	44
3.2.6 COMUNICACIÓN CAN	45
3.2.7 CONECTORES	48
3.3 Esquemático	49
3.4 Lista de materiales.....	52
CAPÍTULO 4: DISEÑO FÍSICO.....	53
4.1 Creación de la placa.....	54
4.2 Especificaciones de los parámetros	54
4.3 Colocación de los componentes.....	55



4.4	Rutado de la placa	59
4.5	Finalización de la placa	64
4.6	Documentación	66
4.6.1	ESPECIFICACIONES DE FABRICACIÓN	68
CAPÍTULO 5: PROGRAMACIÓN STM32F103C8T6		69
CAPÍTULO 6: VALIDACIÓN DEL SISTEMA		72
6.1	Fabricación	72
6.1.1	ESTUDIO DE MERCADO	72
6.1.2	PROTOTIPO RÍGIDO	75
6.1.3	PROTOTIPO FLEXIBLE	76
6.2	Validación	78
6.2.1	VALIDACIÓN DE FABRICACIÓN	78
6.2.2	VALIDACIÓN FUNCIONAL	78
CAPÍTULO 7: PRESUPUESTO		80
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS		81
8.1	Conclusiones Finales.....	81
8.2	Posibles trabajos futuros.....	82
Referencias		83
Anexos		85

Índice de figuras

Fig. 2.1.	Circuito Impreso flexible	12
Fig. 2.2.	Elementos de un FPC	13
Fig. 2.3.	Familias de materiales base	14
Fig. 2.4.	FPC de una sola capa sin y con recubrimiento	16
Fig. 2.5.	FPC de doble acceso	17
Fig. 2.6.	FPC de doble capa	18
Fig. 2.7.	FPC multicapa	19
Fig. 2.8.	Circuito rígido-flexible	20
Fig. 2.9.	Lamina de componentes pasivos impresos	24
Fig. 2.10.	Cámara Olympus Stylus sin carcasa	26
Fig. 2.11.	Iphone 4	27
Fig. 2.12.	Células solares flexibles	27
Fig. 2.13.	Moda vestible	28
Fig. 2.14.	Smart Sensor Glove	29
Fig. 3.1.	Diagrama de requisitos de producto	30
Fig. 3.2.	Diagrama de bloques del sistema	31
Fig. 3.3.	STM32F103C8T6	32
Fig. 3.4.	Bloques STM32F103C8T6	33
Fig. 3.5.	Cristal ABM3-8.000MHZ-D2Y-T	39
Fig. 3.6.	Estructura de un regulador	40
Fig. 3.7.	Regulador TPS1733DCKT	40
Fig. 3.8.	Circuito de aplicación TPS1733DCKT	41
Fig. 3.9.	Impedancia en función del dieléctrico	43
Fig. 3.10.	Distribución de divisor de tensión	44
Fig. 3.21.	Comunicación CAN	45
Fig. 3.12.	Transceiver SN65HVD230	47
Fig. 3.13.	Encapsulado NUP2105LTG1	47
Fig. 3.14.	Empleo de NUP2105LTG1 en comunicación CAN	48
Fig. 3.15.	Conector 502386-0270	48
Fig. 3.16.	Conector 502386-0470	49
Fig. 3.17.	Flujo de captura de esquemático	49
Fig. 3.18.	Esquemático	50
Fig. 3.19.	Descripción de bloques del esquema	51
Fig. 3.20.	Lista de materiales	52
Fig. 4.1.	Flujo de trabajo OrCAD Layout	53
Fig. 4.2.	Diagrama del paso de captura a layout	54
Fig. 4.3.	Contorno de la tarjeta	54
Fig. 4.5.	Footprints creados de forma manual	56
Fig. 4.6.	Posición de los componentes en la tarjeta	57
Fig. 4.7.	Marcadores de referencia	58
Fig. 4.8.	Nesting circuitos flexibles	60

Fig. 4.9.	<i>Izquierda correcta, derecha errónea</i>	61
Fig. 4.10.	<i>Consideraciones EMC</i>	63
Fig. 4.11.	<i>Rutado Final</i>	64
Fig. 4.12.	<i>Herramienta Statistic.....</i>	65
Fig. 4.13.	<i>DCR.....</i>	65
Fig. 4.14.	<i>Capas habilitadas</i>	66
Fig. 4.15.	<i>Creación de archivos Gerber y archivo de taladro</i>	67
Fig. 4.16.	<i>Estandar ODB++</i>	67
Fig. 5.1.	<i>Representación esquemática de la carga de trabajo según el lenguaje de programación empleado, para el mismo resultado</i>	70
Fig. 5.2.	<i>Programa para MCU STM31F103C8T6.....</i>	71
Fig. 6.1.	<i>Fabricación de prototipo con máquina LPKF.....</i>	75
Fig. 6.2.	<i>Cara Bottom Prototipo soldado manualmente</i>	76
Fig. 6.3.	<i>FlexPrototype ambas caras.....</i>	76
Fig. 6.4.	<i>Montaje prototipo flexible.....</i>	77
Fig. 6.5.	<i>Lectura sensores humedad, presión y temperatura</i>	79



Índice de Tablas

<i>Tabla 1: Cronograma de la distribución de tareas</i>	<i>9</i>
<i>Tabla 2: Propiedades de la Poliimida</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 3: Pinout microcontrolador</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 4: Tabla de clases</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 5: Presupuestos desglosados por empresas</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 6: Presupuestos desglosados por empresas</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 7: Coste de los materiales</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 8: Coste de desarrollo.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 9: Coste de desarrollo.....</i>	<i>80</i>

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Este Trabajo Fin de Grado, con título “*Implementación sobre sustrato flexible de un sistema de adquisición de datos analógicos y envío mediante bus CAN*”, se ha desarrollado en el departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática.

1.1 Motivación

La motivación de éste Trabajo de Fin de Grado (TFG) viene dada por la necesidad de integrar la plataforma de microclima CIDETEC (CIDETEC, San Sebastián, España) en una prótesis de un brazo artificial (proyecto HYPER). Dicha plataforma está compuesta por sensores de presión, temperatura y humedad.

- Sensor de presión: Sensor desarrollado por CIDETEC, basado en electrónica plástica mediante tecnología de *screen-printing*, son totalmente flexibles y el tamaño de pixel es de $1 \times 1 \text{ cm}^2$ y $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$. El principio de funcionamiento está basado en cambio resistivo asociado al presionar la superficie del mismo.
- Sensor de temperatura: Es un termistor comercial del tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*) que a 25°C presenta una resistencia de 10 K ohmios. El principio de funcionamiento está basado en el cambio resistivo asociado a la variación de temperatura, a mayores temperaturas el sensor presenta menor resistencia.
- Sensor de humedad: Sensor desarrollado por CIDETEC, basado en nanopartículas semiconductoras de óxido de cinc (ZnO) depositadas sobre electrodos interdigitalizados. El principio de funcionamiento está basado en la condensación capilar de las moléculas de agua presentes en el ambiente sobre la superficie de las nanopartículas. Este fenómeno produce un cambio de conductancia del sistema.

La información otorgada por sendos sensores es de carácter analógico. Dentro del proyecto HYPER, en el que está embarcado este sistema de sensores, se ve la necesidad de poder transmitir dicha información por el protocolo de comunicación por bus CAN. Por lo que es necesario crear un sistema capaz de interpretar los datos analógicos otorgados por el sistema de sensores y otorgarlos mediante el protocolo CAN. Dicho sistema ha de ser apto para su emplazamiento en la prótesis del brazo, es decir, entre otras cualidades, debe ser de tamaño reducido y con la mayor flexibilidad posible para poderse adaptar al contorno de la prótesis.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es implementar sobre un sustrato flexible un sistema de adquisición de datos de carácter analógico y envío de esta información mediante bus CAN. Para ello se pueden distinguir una serie de objetivos secundarios, los cuales implicarán la consecución del primero:

- Realizar un estudio de las características del sustrato flexible y de las empresas que trabajan con este tipo de material para tener una visión de la situación actual del mercado.
- Elección de los componentes electrónicos necesarios para el correcto diseño del circuito impreso (PCB).
- Realizar un diseño hardware que cumpla con los requisitos requeridos.
- Realizar la programación del microcontrolador, de forma que, todos los registros necesarios para la recepción y transmisión de datos tengan la configuración adecuada.
- Fabricar y validar el sistema real, utilizando los equipos de medida presentes en el laboratorio.
- Documentar todo el procedimiento seguido exhaustivamente, de manera que sirva de guía para futuros trabajos.

1.3 Recursos utilizados

Para la realización de este Trabajo Fin de Grado se han utilizado una serie de herramientas y programas software. Son las mostradas a continuación:

- OrCad Capture CIS: Esta herramienta permite simular mediante ordenador circuitos del ámbito eléctrico y electrónico. Consta de una interfaz gráfica donde se puede crear los diferentes circuitos y componentes deseados. La herramienta te permite crear una lista de conexiones para un correcto paso del diagrama electrónico al diseño físico del circuito.
- OrCad LayOut: Herramienta que permite crear las huellas (*footprints*) de cada componente para su posicionamiento y hacer el rutado de la placa (*layout*) para su posterior fabricación. Te permite utilizar huellas disponibles dentro de las librerías propias de OrCad o crear los necesarios. Este programa sirve para delimitar las dimensiones de la placa y generar la documentación necesaria para fabricación de ésta (archivos Gerber).
- Matlab: La herramienta matemática está indicada para un gran número de aplicaciones dada su gran potencia y versatilidad. En este trabajo se utilizara para realizar la programación del microcontrolador a través de la aplicación Simulink.
- Simulink: Entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación Matlab. Es una herramienta de simulación de modelos o sistemas.

1.4 Tareas a desarrollar y planificación

Para conseguir los objetivos anteriormente descritos, se van a identificar las distintas tareas a realizar en este Trabajo Fin de Grado.

Tarea 1: Estado del arte del diseño y fabricación de PCBs en sustrato flexible.

Búsqueda de información de los distintos tipos de PCBs flexibles, y de empresas españolas y extranjeras que se dediquen tanto a la fabricación como al montaje de éstos, extrayendo datos acerca de la evolución histórica, comparativa entre sistemas rígidos y flexibles, técnicas para su implementación y costes.

Tarea 2: Especificaciones de circuito

- a. Elección de componentes: Esta tarea se basa en hacer un estudio de los componentes necesarios para el desarrollo del sistema. Se hace una comparativa de las posibles alternativas existentes en el mercado y se selecciona aquella que cumpla mejor los requisitos deseados.
- b. Manejo OrCad Capture CIS: Consiste en aprender a utilizar la herramienta por medio de guías y tutoriales.
- c. Diseño del circuito: Una vez seleccionados los componentes se crea una librería en OrCad que represente los componentes y se establecen las conexiones eléctricas que conforman el circuito.

Tarea 3: Diseño físico del circuito

- a. Huellas: Consiste en crear y otorgar a cada componente el *footprint* que le corresponde basado en la información recogida en su hoja de características.
- b. Información de diseño y rutado: Recogida de información y estudio de las características del diseño y rutado de las placas flexibles.
- c. Rutado: Realizar mediante la herramienta OrCad LayOut el rutado de la placa y generar la documentación y archivos Gerber para su fabricación.

Tarea 4: Programación del microcontrolador “STM32F103C8T6”

Consiste en hacer el desarrollo software del microcontrolador de tal modo que pueda interpretar las entradas analógicas de éste y producir una salida CAN con dicha información.

Tarea 5: Fabricación y Validación

- a. Fabricación: Búsqueda de empresa que cumpla los requisitos deseados y envío de documentación para su fabricación.
- b. Validación de montaje: Una vez recibido el prototipo comprobar su correcta fabricación y montaje. Cotejar que los componentes corresponden a los recogidos en la lista de materiales (BOM), examinar visualmente posibles defectos.
- c. Validación funcional: Por último realizar un test funcional verificando la salida del regulador y provocando cambios de humedad, temperatura y presión, que deben ser reflejados en los datos transmitidos por el bus CAN.

Tarea 6: Generación del documento

Una vez realizadas todas las pruebas y verificaciones se van a recoger las distintas conclusiones obtenidas en cuanto a su análisis, diseño y presentaciones. Además se realizara una exhaustiva descripción de todo el proceso desarrollado, incluyendo la carga teórica necesaria para una completa comprensión

La disposición de la previsión de estas tareas a lo largo del tiempo queda reflejada en la siguiente tabla a modo de cronograma.

TAREAS		ENE-14				FEB-14				MAR-14				ABR-14				MAY-14				JUN-14			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Tarea 1: Estado del arte PCBs flexibles																									
Tarea 2: Especificaciones del circuito	Tarea 2a																								
	Tarea 2b																								
	Tarea 2c																								
Tarea 3: Diseño físico del circuito	Tarea 3a																								
	Tarea 3b																								
	Tarea 3c																								
Tarea 4: Programación del microcontrolador																									
Tarea 5: Fabricación y validación	Tarea 5a																								
	Tarea 5b																								
	Tarea 5c																								
Tarea 6: Generación del documento																									

Tabla 1: Cronograma de la distribución de tareas

1.5 Estructura del documento

La presente memoria se ha dividido en una serie de capítulos, los cuales abordan en primer lugar el fundamento teórico para luego paso a la implementación real.

Finalmente, se termina con una validación y evaluación del sistema y el análisis de los resultados.

En el capítulo dos se realiza una descripción del estado del arte de las tarjetas de circuitos impresos flexibles. Se describe su historia, componentes y aplicaciones, y se concreta la información de los circuitos flexibles para dispositivos *wearables* (que pueden ser llevados puestos).

En el capítulo tres se describen los distintos dispositivos *hardware* que se emplean en el diseño del circuito del sistema.

En el capítulo cuatro se especifica el proceso de diseño físico del sistema y se enumera de forma exhaustiva los distintos aspectos que se deben tener en cuenta a la hora de hacer el rutado de una placa flexible.

En el capítulo cinco se explica el desarrollo software del microcontrolador.

En el capítulo seis se determina la fabricación y montaje, y se realiza una validación del sistema, comprobando que cumple con los requisitos.

En el capítulo siete, se recoge el presupuesto que ha sido necesario para la elaboración de este proyecto.

En el capítulo ocho, por último, se exponen una serie de conclusiones del Trabajo Fin de Grado, así como posibles mejoras o trabajos futuros partiendo de esta base.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se va a realizar una prospectiva tecnológica de circuitos flexibles debido a las grandes prestaciones que ofrecen. Entre estas prestaciones se destacan una gran reducción de peso y de volumen, con los beneficios que esto representa.

Además con este tipo de circuitos se consigue un mejor aprovechamiento del espacio y la posibilidad de ajustarse a determinadas formas geométricas, siendo éste un aspecto de gran importancia en el diseño de este Trabajo Fin de Grado.

2.1 Circuitos impresos Flexibles

Una placa de circuito impreso o PCB (*Printed Circuit Board*), se utiliza para sostener mecánicamente, y conectar eléctricamente, componentes electrónicos usando caminos conductores o pistas laminadas sobre un sustrato no conductor.

La electrónica flexible, también conocidos como circuitos flexibles, es una tecnología para el montaje de PCBs mediante el ensamblaje de los dispositivos electrónicos en sustratos de plásticos flexibles, tales como poliimida, PEEK o películas de un poliéster conductor transparente. Además, los circuitos flexibles pueden ser serigrafiados con circuitos de plata en poliéster.

Los PCB flexibles puede ser fabricados con los mismos componentes electrónicos que se usan para los PCB rígidos, como es el caso de los componentes usados en este Trabajo Fin de Grado, es decir, la elección de los componentes no depende de si su finalidad es para ser montado en rígido o en flexible. Estos circuitos impresos flexibles o FPC (*Flex Printed Circuit*) se hacen con una tecnología de fotolitografía.

Una forma alternativa de hacer circuitos de láminas flexibles o cables planos flexibles o FFC (*Flexible Flat Circuit*) es laminar tiras de cobre muy fino (0,07 mm) en medio de dos capas de PET. Estas capas de PET, típicamente 0,05 mm de espesor, están recubiertas con un adhesivo que es termoestable, y se activan durante el proceso de laminación. En la *Fig. 2.1*, se puede apreciar un ejemplo de FPC.



Fig. 2.1. Circuito Impreso flexible

2.1.1 HISTORIA

La tecnología flexible tiene sorpréndeteme una larga historia. Las patentes emitidas durante el siglo veinte muestran que los primeros investigadores estaban buscando la forma de hacer conductores planos entre las capas de materia aislante para el “*layout*” de las aplicaciones de telefonía. Una de las primeras descripciones de lo que puede ser llamado un circuito flexible fue desarrollada por el Dr. Ken Gilleo y divulgada en un patente inglesa por Albert Hansen en 1903 donde Hasen describió una construcción que constaba de conductores metálicos planos en papel recubierto de parafina. Los libros del laboratorio de Thomas Edison del mismo periodo muestran que estaba pensando en un modelo para cubrir con goma de celulosa un papel de lino con grafito en polvo para crear lo que hubiese sido un circuito flexible, aunque no hay evidencias de que esto fuese llevado a la práctica [1].

En la publicación de 1947 “*Printed Circuit Techniques*” (Técnicas de circuito impreso), de Cleo Brunetti y Roger W. Cutis [2], se muestra una breve discusión sobre la creación de circuitos en lo que hubiese sido materiales flexibles (por ejemplo papel). Durante la década de 1950 los inventores de Sander Associates (Nashua, NH) Victor Dahlgren y el fundador Royden Sander lograron avances significativos desarrollando procesos para la impresión y el grabado de conductores planos en bases flexibles para remplazar el uso de cables. Un anuncio emitido en 1950 por *Photocircuits Corporation* (Nueva York) demuestra también su interés activo en los circuitos flexibles [1].

Hoy en día, los circuitos flexibles son conocidos en todo el mundo y usados en muchos tipos de productos. Durante la última década, los circuitos flexibles han sufrido uno de los mayores crecimientos entre todos los productos de interconexión del mercado, llegando a implicar la integración de elementos pasivos y activos. Podemos encontrar circuitos flexibles en dispositivos de uso cotidiano como pueden ser teléfonos móviles o cámaras de fotos, hasta en dispositivos industriales o del campo de la biomedicina.

2.1.2 ESTRUCTURA DE LOS CIRCUITOS FLEXIBLES

Cada elemento del FPC debe ser capaz de cumplir sistemáticamente con las exigencias que requiera el producto durante su vida útil. Además, el material debe funcionar de manera fiable en conjunto con el resto de elementos que conforman el FPC. A continuación se presentan breves descripciones de los elementos básicos de la construcción de circuito flexible y sus funciones.

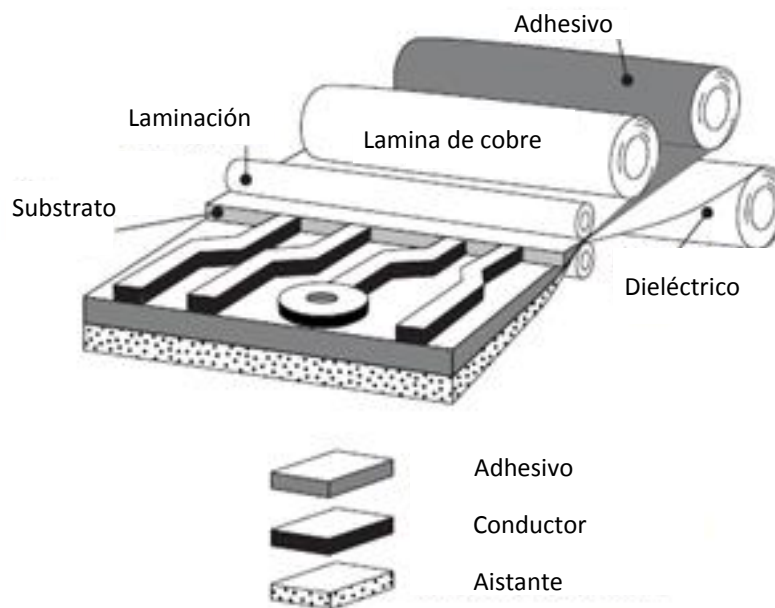


Fig. 2.2. Elementos de un FPC

Material de base

El material base es la película de polímero flexibles que proporciona la base para el laminado. En circunstancias normales, el material de base del FPC proporciona la mayoría de las propiedades físicas y eléctricas del circuito. En el caso de la fabricación de circuitos flexibles sin adhesivo, el material base proporciona todas las propiedades características. Aunque es posible una amplia gama de espesores, la mayoría de la películas flexibles están comprendidas en un rango de 12 micras a 125 micras (1/2mil a 5mils), aunque existen material más gruesos o finos. Cuanto más fino sea el material, por lo general, será más flexible. Para la mayoría de materiales la rigidez es proporcional al cubo del espesor, así, por ejemplo, si se aumenta el espesor al doble de su valor inicial, el material se convertirá en ocho veces más rígido.

Hay distintos tipos de materiales utilizados como base de los FPCs debido a lo ventajoso de sus propiedades como pueden ser: fibra de vidrio con rexina epoxy (FR), poliéster (PET), poliimida

(PI), naftaleno de polietileno (PEN), polieterimida (PEI), junto con diversos fluoropolimeros (FEP)y copolimeros de poliimida.

A la hora de elegir el material base, a parte de las propiedades mecánicas, se debe tener en cuenta tanto sus propiedades térmicas y eléctricas, como su coste. La Fig. 2.3 muestra una comparativa de las distintas familias de materiales [3].

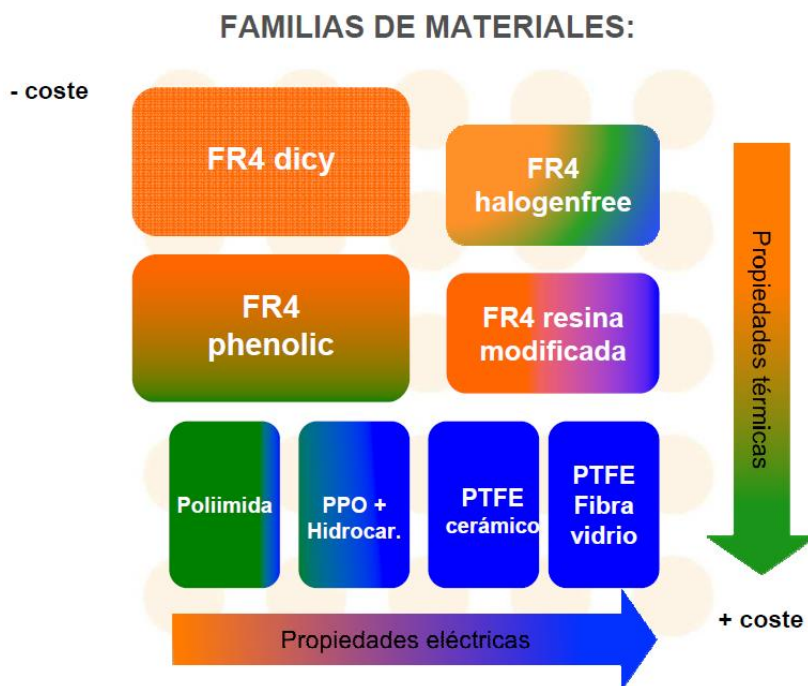


Fig. 2.3. Familias de materiales base

Es por esto que el material base más utilizado es la poliimida, cuya temperatura de degradación es de 400°C. La siguiente tabla muestra las propiedades de la poliimida usada con adhesivo y sin ellos.

	POLIIMIDA (Con Adhesivo)	POLIIMIDA (Sin Adhesivo)
MECÁNICAS		
Flexión (R 2.0 mm)	Bueno	Excelente
Termo formado	No	No
Modulo	2500 MPa	4000 MPa
Resistencia al desgarro	500 g	500 g
Resistencia al pelado	1750 N/M	1225 N/M
QUÍMICAS / AMBIENTALES		
Cáustica (> 20%)	Pobre	Bueno
UV	Bueno	Excelente
UL Reconocimiento / Máximo Temp	85°C–160°C	105°C–200°C
Retardo de la llama	VTM-0 con adhesivos FR	VTM-0
ELÉCTRICAS		

Constante dieléctrica (1 MHz)	3.5	3.3
Rigidez eléctrica	3-5 Kv/25 μ m	5 Kv/25 μ m
Resistencia de aislamiento	10^3 W-cm	10^3 W-cm
TÉRMICAS		
Procesamiento de soldadura	5 s @ 288°C (Pre-secado Req.)	10 s @ 288°C (Sin Pre-secado)
ENSAMBLADO		
Agujero pasante	Excelente	Excelente
Montaje superficial	Buena a Excelente	Excelente
Unión de cableado	Algunos adhesivos están bien	Excelente
CHIP (Conexión directa)	Buena a Excelente	Excelente

Tabla 2: Propiedades de la Poliimida

También se debe tener en cuenta si la finalidad del FPC va a ser para aplicaciones estáticas (caso de este Trabajo Fin de Grado) o dinámicas, es decir, el material vas ser doblado numerosas veces, donde se tendrá que elegir el tipo de material basado más en las propiedades mecánicas que en las propiedades térmicas.

Adhesivo de unión

Los adhesivos se utilizan como medio de unión para la creación de un laminado. Cuando se trata de resistencia a la temperatura, el adhesivo es típicamente el elemento que limita el rendimiento, especialmente, cuando el material base es poliimida. Debido a las dificultades asociadas a la adhesión de la poliimida, muchos circuitos flexibles de poliimida emplean sistemas adhesivos de diferentes familias de polímeros. Sin embargo, se están haciendo grandes incursiones de adhesivos termoplásticos de poliimida. Al igual que ocurría en el material base, el adhesivo de unión puede presentarse es distintos espesores, cuya elección depende de la aplicación para la que se utilice el FPC.

Lamina de metal conductor

Los circuitos flexibles utilizan por lo general una lámina de metal como elemento conductor. La lámina de metal es el material con el que se graban los caminos del FPC. Existe una gran variedad de láminas de metal y de espesores para la fabricación del FPCs, sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones se utilizan láminas de cobres. Esto es debido a su equilibrio entre su coste y sus propiedades físicas y eléctricas. Se distinguen ocho tipos diferentes de láminas de cobre para circuitos impresos, categorizados dentro de dos clases; electrodepositados y forjados, con cuatro subconjuntos cada una y con propiedades distintitas. La opción más común es emplear hojas laminadas y templada aunque cada vez se emplean más películas galvanoplásticas. En la mayoría de las láminas de cobre, se aplica un tratamiento superficial en un lado de la lámina para mejorar la adhesión a la base.

En ciertos casos no estándar, el fabricante del circuito puede crear laminados especiales usando metales alternativos, desde aleaciones de cobre hasta muchos otros tipos de metal.

2.1.3 TIPOS DE CIRCUITOS FLEXIBLES

Existen una serie de construcciones básicas de FPCs, con una variación significativa entre ellas.

A continuación se presenta una descripción de los tipos más comunes de fabricación de circuitos flexibles [4].

Circuitos de una sola cara (*Single-sided flex circuits*)

Los circuitos flexibles de una sola cara tienen una capa conductora hecha, ya sea, de metal o de un polímero conductor sobre una película de dieléctrico flexible. Los componentes son accesibles solo desde un lado. Se pueden presentar vías sobre la base para permitir la inserción de componentes de agujero pasante, que generalmente son soldados. Los FPCs se pueden fabricar con o sin recubrimiento, aunque es la práctica más normal es que lo lleven.

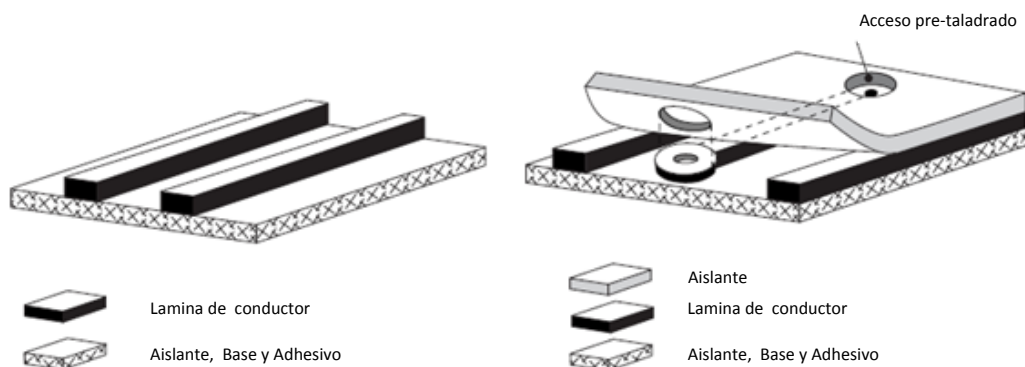


Fig. 2.4. FPC de una sola capa sin y con recubrimiento

Circuitos flexibles de doble acceso o de espalda descubierta (*Double access or back bared flex circuits*)

Son circuitos flexibles que tiene una sola capa conductora pero que se fabrican de tal modo que permiten el acceso a la plantilla del conductor desde ambos lados. Aunque es cierto que tiene beneficios, los requisitos específicos para poder acceder desde los dos lados limitan su uso.

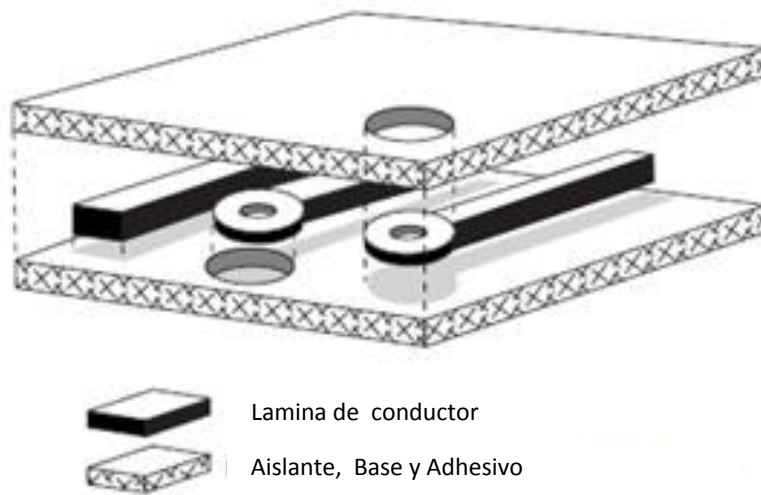


Fig. 2.5. FPC de doble acceso

Circuitos flexibles esculpidos (*Sculptured flex circuits*)

Son un subconjunto de la estructura normal de los circuitos flexibles. El proceso de fabricación implica un método de múltiples pasos de grabado que produce un circuito flexible que tiene conductores de cobre en el que el espesor del conductor difiere en varios lugares a lo largo de su longitud (i. e. los conductores son más finos en zonas flexibles y de mayor espesor en los puntos de interconexión.)

Circuitos flexibles de doble cara (*Double-sided flex circuits*)

Los circuitos flexibles de doble cara son circuitos que tienen dos capas conductoras. Estos circuitos pueden ser fabricados con o sin taladros metalizados. Cuando se construye sin taladros el acceso solo se puede acceder desde un lado, y el circuito se define como “Tipo V (5)” de acuerdo con las especificaciones militares. Este tipo de circuito no suele ser de uso común. Gracias al agujero pasante se proporciona el acceso a las terminaciones de los componentes desde ambos lados de la placa, por lo que los componentes se pueden posicionar también en ambos lados. Este tipo de circuito es el correspondiente al diseño realizado en este Trabajo Fin de Grado y un ejemplo de su construcción aparece en la *Fig. 2.6* .

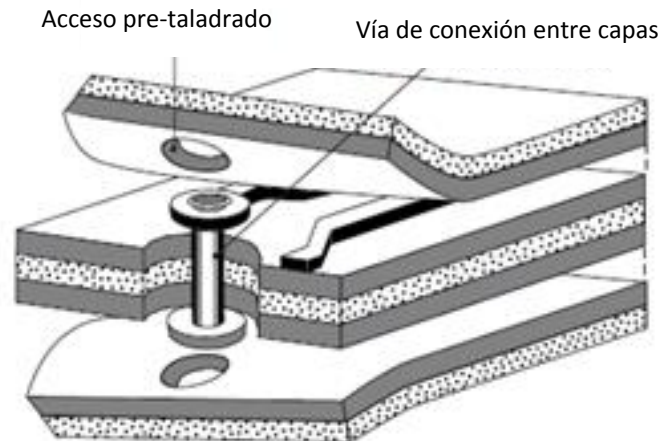


Fig. 2.6. FPC de doble capa

Dependiendo de los requisitos de diseño, estos circuitos pueden ser fabricados con una capa de cobertura (*cover layer*) en una capa, ambas o ninguna, aunque lo más común es aplicar dicha protección a ambas. Una ventaja importante de este tipo de sustrato es que permite que el cruce de conexiones se haga de manera sencilla.

Muchos circuitos se construyen a doble capa solo porque tienen uno o más cruces de conexiones (cruce de pistas). Un ejemplo de uso de este circuito es el circuito de conexión del *mousepad* del ordenador. Todos los componentes están contruidos en una sola capa, a excepción de algún cruce para el que se utiliza la segunda capa.

Circuito flexible multicapa (*Multilayer flex circuits*)

Los circuitos flexibles que tienen tres o más capas se consideran multicapa. Comúnmente las capas están interconectadas a través de vías, aunque esto es un requisito de definición. Las distintas capas pueden estar o no laminadas continuamente, con la excepción obvia de las vías. La práctica de laminado discontinuo es común en los casos donde se requiere una mayor flexibilidad. Esto se logra dejando sin unir las zonas en las que se debe dar el flexionado.

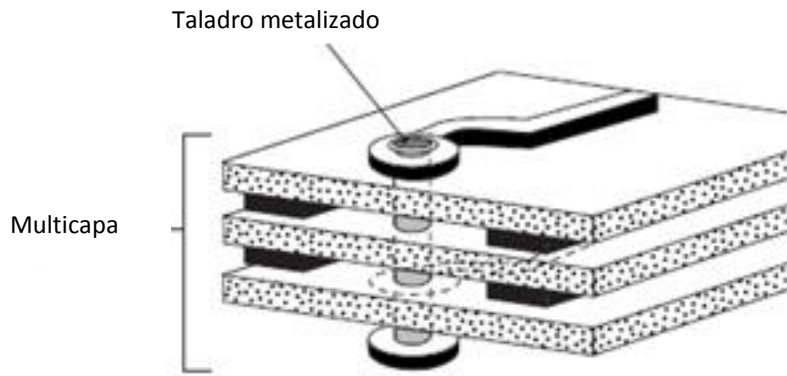


Fig. 2.7. FPC multicapa

Circuitos semirrígidos (*Rigid-flex circuits*)

Los circuitos semirrígidos o rígidos-flexibles (*rigid-flex*) son una construcción híbrida que consiste en laminar en una misma estructura sustratos flexibles y rígidos. No se deben confundir con las construcciones flexibles rigidizadas (*rigidized or stiffened flex circuit*), que son simplemente estructuras flexibles con un refuerzo local en las zonas en las que se requiere soporta el peso de algún componente electrónico. Así que, aunque los conceptos suenen parecido se refieren a productos completamente distintos.

Los circuitos rigid-flex pueden tener una o varias capas que normalmente están interconectadas por vías. Con los años estos circuitos han gozado de gran popularidad en los diseños de productos militares, sin embargo, esta tecnología presenta un aumento de uso en productos comerciales. Aunque fue considerado un producto especial para aplicaciones de bajo volumen, hoy en día el uso de *rigid-flex* en ordenadores portátiles está muy extendido.

Los circuitos *rigid-flex* tienen, por lo general, una estructura multicapa, sin embargo también se presentan en construcciones a dos capas.

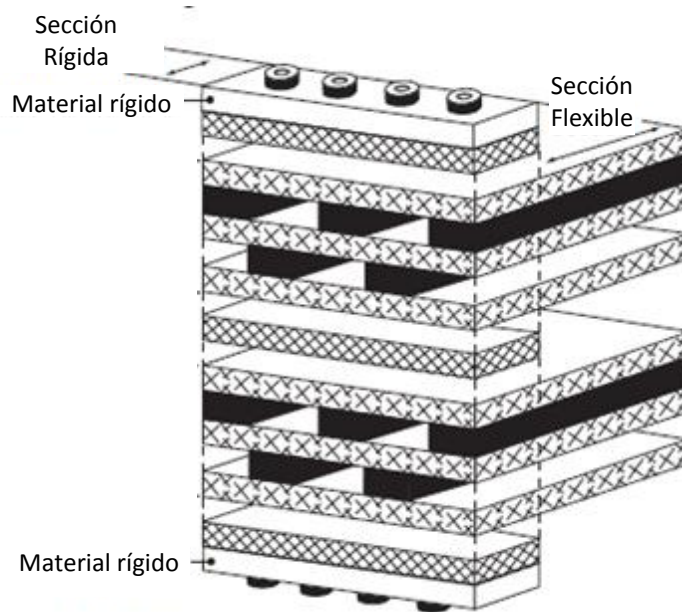


Fig. 2.8. Circuito rígido-flexible

Circuitos flexibles de polímero de película gruesa (*Polymer thick film flex circuits*)

Los circuitos flexibles de polímero de película gruesa o PTF (*Polymer thick film*) son circuitos donde los conductores son impresos sobre una base de película de polímero. Son típicamente estructuras de una sola capa, sin embargo, dos o más capas pueden ser impresas secuencialmente con capas aislantes impresas entre las capas conductoras. Debido a la baja conductividad del conductor no son aptos para cualquier tipo de aplicación. Los PTFs sirven para una amplia gama de aplicaciones de baja potencia con valores de voltaje ligeramente superiores. Los teclados son una aplicación común, sin embargo, hay una amplia gama de aplicaciones potenciales para este tipo de propuesta rentable de circuito flexible.

2.1.4 PROCESOS DE FABRICACIÓN

La fabricación de los circuitos flexibles es un proceso muy variable.

Algunos de los pasos para la fabricación de este tipo de circuitos tienen un alto grado de similitud con el proceso de fabricación de los circuitos rígidos, siendo una de las diferencias más significativas la susceptibilidad del proceso de los circuitos flexibles *roll- to- roll*, gracias a ello se consigue una fabricación en volumen alto y un coste bajo por cada circuito. Sin embargo, la fabricación de circuitos *roll to roll* causa distintos problemas de producción, como la precisión y las dificultades con las tolerancias del circuito dado la capacidad del material para ser expandido durante el proceso de fabricación [5].

Debido a que hay muchos tipos de circuitos impresos flexibles, como se ha explicado en el apartado anterior, nos centraremos en los principales procesos relacionados con la fabricación de los FPC y en algunas de las diferencias con respecto a la fabricación de circuitos rígidos.

Fabricación del rutado

Parte de la fabricación de este tipo de circuitos se ha adaptado a las técnicas más populares usadas en las placas rígidas, que teniendo en cuenta las limitaciones, se han acondicionado, las técnicas a las necesidades de los circuitos flexibles.

La producción de doble acceso y circuitos multicapa requiere unas técnicas más sofisticadas e involucra etapas de procesos adicionales.

Limpieza del laminado

El punto de partida para la fabricación de este tipo de circuitos es tener un laminado recubierto de cobre, puede ser de dos formas:

- Con una capa adhesiva de cobre.
- Laminado sin adhesivo.

Hay una gran variedad de razones para la limpieza del laminado antes de su posterior elaboración. En cobre y laminados de aluminio revestido lo más probable es estar provisto de un material anti-lustre en su superficie para prevenir la oxidación y las manchas. Este recubrimiento es perjudicial en los pasos posteriores por lo que debe ser eliminado por inmersión en un baño de ácido ó con un pulverizador de grabado ácido.

A continuación la lámina puede ser micro-grabada con un tratamiento de persulfato de sodio para promover resistir la adhesión, después de esto la placa estará recubierta con un agente oxidante para prevenir el deslustre en otras operaciones.

Fijado de la imagen

Seguido se genera un patrón que refleje las pistas del circuito necesarias, lo más utilizado es serigrafía (*screen printing*) y foto-imagen (*Photo imaging*).

La serigrafía es una técnica establecida que puede sedimentar en la superficie del laminado de 4-50 micras de espesor. El control del proceso de impresión de la pantalla puede ser una forma de arte, ya que hay muchas variables como la coherencia, la tensión, geometría... etc. En la impresión se imprime directamente el laminado deseado. Este proceso será descrito de forma más detallado posteriormente por los beneficios que supone para los circuitos flexibles.

La foto imagen se lleva a cabo usando una película foto-resistente seca que se aplica a toda la superficie del laminado. La foto-máscara consiste en ilustrar las pistas de circuitos deseadas. El conjunto se expone a la luz UV que endurece la capa protectora donde no está protegiendo la máscara. Posteriormente se quita químicamente el material sobrante para revelar el laminado estampado.

Grabado del revelado

El objetivo de este paso es eliminar el material del conductor sin protección para dejar un modelo selectivo en la superficie del laminado. La sustancia aplicada previamente es impermeable al agente de grabado seleccionado. Este reactivo de ataque se encarga de eliminar el cobre en un proceso controlado de la misma forma que en el paso de limpieza inicial.

El laminado puede estar expuesto a la solución de ataque por inmersión, o ser rociado con la solución de grabado.

La sustancia protectora, después de haber realizado su función en la protección de las pistas de circuito requeridos ahora se elimina a través de un producto químico por separado o de la etapa de procesamiento mecánico

Capa protectora

No es deseable tener un circuito en el que el modelo del conductor sea vulnerable a los arañazos y cortocircuitos eléctricos a través de un contacto accidental con la capa conductora. La capa dieléctrica protectora se coloca en la parte superior para evitarlo deteniendo el impacto con el medio ambiente y la integridad del mantenimiento eléctrico.

Taladrado y contorno

Una de las últimas etapas de fabricación es producir el contorno requerido y los agujeros a través de las capas, para ello se pueden emplear numerosas técnicas de fabricación, siendo el troquelado una de las más populares. Las máquinas modernas de troquelado ofrecen una alta precisión.

Además una de las técnicas para realizar el taladrado y el contorno de una FPC monocapa es realizarlo sobre un sustrato rígido, y mediante técnica laser hacer los cortes sobre la lámina flexible para su posterior retirada.

Prueba y verificación

El último paso para la fabricación de circuitos flexibles es verificar el circuito y la calidad de las especificaciones del conjunto.

2.1.5 SCREEN-PRINTING

Screen-printing o serigrafía es una tecnología *thick film* de baja resolución que se puede aplicar a los sustratos plásticos así como cerámicos como el vidrio o el silicio. Es una de las técnicas más usada para la fabricación de circuitos impresos. Gracias a esta técnica se pueden obtener impresos de calidad a muy bajo coste. Este sistema de impresión permite realizar múltiples copias del mismo diseño haciéndolo ideal para la producción en serie, necesaria para la comercialización. Básicamente consiste en transferir una tinta a través de una malla. La serigrafía requiere de tintas especiales.

Las principales ventajas de este tipo de impresión son:

- Posibilidad de reproducir más de un circuito en la misma malla.
- Poco tiempo de realización.
- Buena calidad en la impresión.

Actualmente los tres métodos más usados para la aplicación en la PCB son:

- Serigrafía manual, que puede ser utilizada cuando los anchos de líneas son mayores de 7 mil y la tolerancia de inscripción de 5 mil.
- LPI (*Liquid Photo Imaging*), ofrece una mayor precisión y se emplea cuando los anchos de línea son mayores de 4 mil.
- DLP (*Direct Legend Printing*), es la más precisa pero también la de mayor coste.

Componentes pasivos mediante Screen Printing

Esta técnica se ha utilizado principalmente en la industria de la microelectrónica para la fabricación de las pistas de tarjetas de circuitos impresos en dos dimensiones. Para utilizar *Screen-printing* como una técnica de fabricación de microsistemas solamente se necesita realizar la estructura tridimensional del depósito de tinta [6]. Visto como un método de fabricación de elementos tridimensionales capa por capa, es posible imprimir con diferentes tintas comerciales disponibles que pueden ser funcionalizadas mediante la adición de distintos catalizadores y/o enzimas. La posibilidad de imprimir diferentes capas con diferentes tintas permite una variedad ilimitada de diseños y la incorporación de elementos activos.

Los componentes más representativos fabricados gracias a esta tecnología, son una serie de componentes pasivos (resistencias, condensadores e inductancias) impresos construidos en sustratos flexibles (*Fig. 2.9*). Esto es debido al uso de tintas especiales de plata, tintas de

carbono o tintas dieléctricas entre otras, además de materiales aislantes propios de la tecnología imprimible [7].

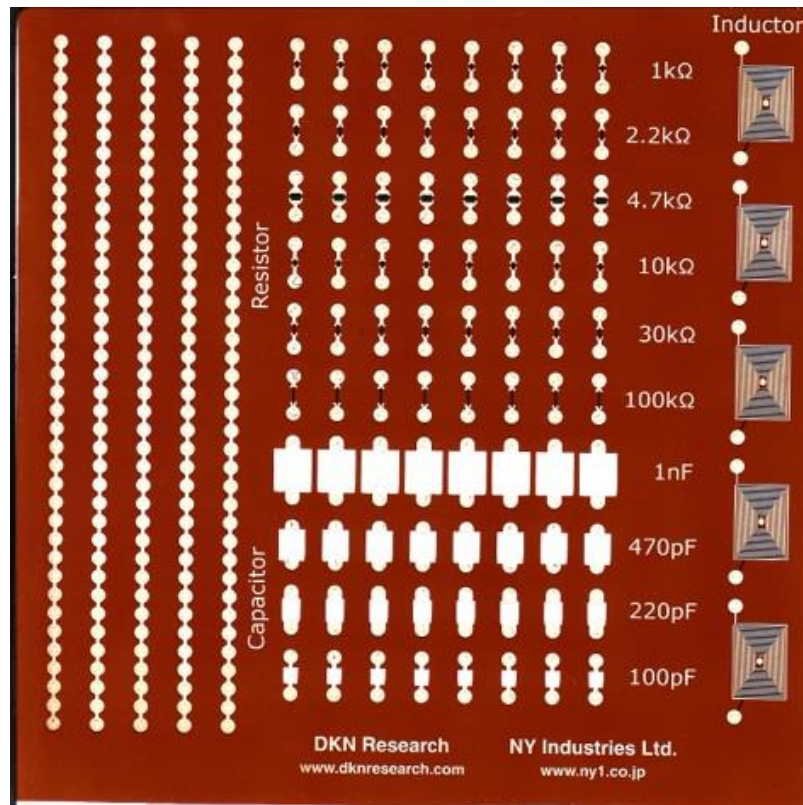


Fig. 2.9. Lamina de componentes pasivos impresos

Las pistas conductoras de estos componentes están disponibles para la soldadura, a diferencia de los circuitos de polímero de película gruesa tradicionales donde la soldadura no es posible. Además, esta tecnología de serigrafía hace posible la construcción de componentes pasivos integrados en circuitos de sustratos flexibles. Por lo que durante la fabricación del FPC se puede crear las resistencias y condensadores sin necesidad de tener que acopiar éstos. Estos componentes impresos ofrecen una serie de ventajas sobre los componentes discretos, como son la capacidad de potencia y la fiabilidad.

2.1.6 VENTAJAS DE LOS CIRCUITOS FLEXIBLES

Los beneficios incluyen las variantes técnicas más deseadas por los fabricantes de productos electrónicos. Desde la solución a problemas de interconexión y compactación hasta su sorprendente comportamiento térmico.

A continuación se explican estas ventajas con más detenimiento.

1. Una solución al problema de armonizar la ubicación e interrelación de grupos de componentes y subconjuntos.

- Posibilitan diseños para mejorar los problemas de interconexión.
 - Se conforman fácilmente para complementar conjuntos de tres dimensiones (3D), posibilitando la compactación y consecuente reducción del tamaño de los equipos.
2. Reducción de costos de ensamblado.
- Un circuito flexible tiene una favorable prestación costo-beneficio en la instalación y/o reparación de sus partes.
 - Los circuitos flexibles pueden ser testeados antes del montaje de los componentes.
 - La eliminación de conectores y uniones de soldadura reduce costos y aumenta la fiabilidad.
3. Sustitución de circuitos rígidos y cableados.
- Los circuitos flexibles simplifican el sistema de diseño.
 - También reducen el número de interconexiones y eliminan el nivel de error humano en la confección y montaje de cables, ya que los mismos son reemplazados por un circuito flexible diseñado por programas CAD que garantizan la repetitividad del proceso.
4. Reducción de peso y espacio.
- Considerable reducción de peso y espacio respecto de los mazos de cables.
 - Su espesor total puede ser tan delgado como 0,10 mm.
5. Flexión dinámica
- La delgadez del sustrato hace de los circuitos flexibles el mejor candidato para aplicaciones dinámicas soportando millones de flexiones.
 - Soportan condiciones superiores de vibración que los circuitos rígidos.
6. Cualidades eléctricas
- Facilita el control de impedancia y provee características eléctricas uniformes para circuitos de alta velocidad.
 - Son especialmente apropiados en diseños que requieren líneas delgadas y alta densidad.
7. Comportamiento térmico y aplicaciones en requerimiento de altas temperaturas.
- Los circuitos flexibles disipan en mayor medida que cualquier otro dieléctrico.
 - Se diseñan para soportar un amplio rango de temperaturas y ambientes extremos.
8. Estética.
- Los circuitos flexibles mejoran sensiblemente la apariencia interna de un conjunto electrónico, lo cual puede tener una influencia decisiva en la decisión de los fabricantes de equipos electrónicos y usuarios de implementar su aplicación.

2.1.7 APLICACIONES

El uso de los circuitos flexibles ha progresado de un relativo bajo volumen, alto precio y aplicaciones en equipos de alto tecnología, a ocupar un lugar dentro de lo cotidiano en los elementos que se utilizan en nuestros hogares y, por consiguiente, a bajo costo y extendida utilización.

Aunque actualmente su incorporación es muy baja en diseños locales, han sido producidos durante dos décadas por la industria en cantidades significativas. Hoy existe una gama de aplicaciones en productos de uso habitual.

En la industria automotriz tienen distintas aplicaciones, desde los sensores del motor, o sistemas ABS, hasta las conexiones del panel de instrumentos. También en las paredes de ómnibus y automóviles. Desde que la industria automotriz incrementó su contenido de electrónica, el volumen de uso de circuitos flexibles ha aumentado notablemente.

Uno de los mayores mercados de crecimiento ha sido su aplicación en complementos y accesorios de mano, que van desde unidades GPS hasta asistentes digitales personales.

Se tiene el ejemplo de las cámaras digitales como en el modelo Olympus Stylus (*Fig. 2.10*).

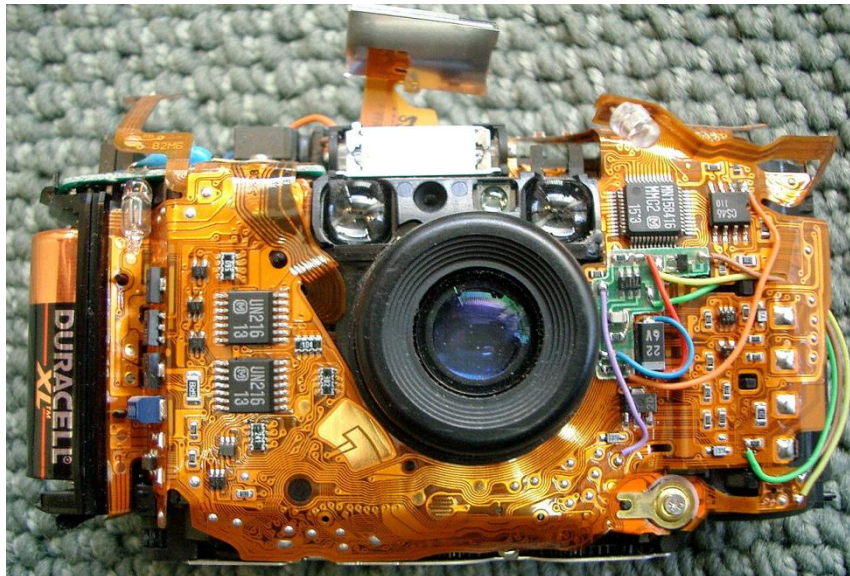


Fig. 2.10. Cámara Olympus Stylus sin carcasa

En la fabricación de pantallas de cristal líquido (LCD), el vidrio se utiliza como un sustrato. Si en su lugar fuesen usados finas películas de plástico o metal como sustrato, el sistema entero puede ser flexible ya que la película depositada en la parte superior del sustrato es generalmente muy fina (de orden de micrómetros).

En gran cantidad de teléfonos móviles se utiliza el diseño en placas flexibles, un ejemplo de esto es el modelo iPhone 4 de la compañía Apple (*Fig. 2.11*).



Fig. 2.11. Iphone 4

Por otro lado el mercado de mayor corriente para los circuitos flexibles se encuentra en los periféricos informáticos, los cuales incluyen paneles de *displays* y discos rígidos. En impresoras de inyección de tinta las cuales basan su funcionamiento esencialmente en la expulsión de gotas de tinta líquida a través de las boquillas de unos cabezales inyectoros. El cabezal de impresión incluye un circuito flexible formado por una delgada lámina que presenta una matriz de las citadas boquillas a través de las cuales sale una cantidad precisa de tinta lanzada en una dirección adecuada hacia el papel de impresión.

También están en la actualidad en uso creciente en aplicaciones del sector médico y de las telecomunicaciones.

Se han desarrollado células solares flexibles (*Fig. 2.12*). Estas células pueden emplearse para diversas aplicaciones, pero suponen un gran avance en la alimentación de los satélites. Son ligeras, pueden ser enrolladas durante el lanzamiento, y son fáciles de implementar, por lo que suponen una buena opción para este tipo de aplicaciones.

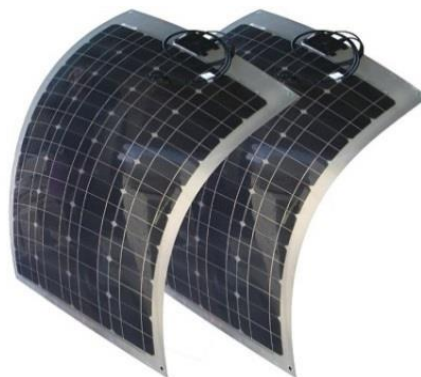


Fig. 2.12. Células solares flexibles

La tendencia en todos los sectores, sobre todo en el tecnológico, es realizar objetos cada vez más pequeños por lo cual se hace cada vez más conveniente el uso de la tecnología flexible.

Una última aplicación de los FPCs es la que aplica al proyecto en el que está embarcado este Trabajo Fin de Grado, que se trata de los dispositivos vestibles.

2.2 Tecnología vestible

La tecnología visible o ponible, del inglés *wearable*, es el término que describe a aquellas prendas que pueden ser vestidas y que incorporan elementos tecnológicos.

Este tipo de tecnología hoy en día está presente en muchos sectores, como puede ser el mundo de la moda, donde se desarrollaban prendas de vestir con dispositivos electrónicos en las que prima la función estética sobre la funcional (*Fig. 2.13*). Otro sector donde está despuntando es el de los gadgets, con inventos revolucionarios como los teléfonos de pulsera, o las *Google Glass* (gafas interactivas diseñadas por la empresa Google). Sin embargo, es en el sector de la tecnología biomédica y la robótica (*wearable robots*), donde ha sufrido un mayor desarrollo, y esto es debido al empleo de los circuitos impresos flexibles.



Fig. 2.13. Moda vestible

Un *wearable robot* es un sistema mecatrónico que está diseñado basado en la forma y la función del cuerpo humano, con segmentos y articulaciones correspondientes a los de la persona a la que está acoplado [8]. El creciente reconocimiento de la comunidad científica significa que esta tecnología es ahora empleada en telemanipulación, la investigación del control neuromotor y la rehabilitación, y para ayudar con una alteración de control motor humano.

Un ejemplo de este tipo de tecnología vestible basada en circuitos flexibles para la rehabilitación médica es el “*Novel Smart Sensor Glove for Arthritis Rehabilitation*” [9]. Se trata de un guante de captación de datos capaz de medir la cinemática de las articulaciones de los

dedos y que puede proporcionar información de la ROM (*Range of Motion*) objetivo útil para la evaluación clínica de la mano y la rehabilitación de problemas de artritis. Se trata de un sistema de guante que se puede usar tanto en la derecha y de la izquierda (al girar la FPC), centrándose en las limitaciones de los pacientes con discapacidad de la mano. Desde el punto de vista de la interconexión de señales, está formado por un total de 47 sensores que se dividen en 3 grupos en los que cada uno de los sensores que pertenecen al grupo se multiplexa los mismos bloques analógicos / digitales, lo que permite el intercambio de circuitos de acondicionamiento de la señal.

La unidad de control está formada por un microcontrolador, que procesa los datos que son enviados a través de un enlace inalámbrico a una estación base remota en la que se visualiza y procesa los datos.

El objetivo principal del guante es para la medición de la amplitud articular de la mano, incluyendo: flexión, extensión, aducción y abducción de las articulaciones de los dedos. El guante se integra un total de 47 sensores para captar el movimiento de la mano y el dedo de, pudiendo ser calibrado para usuarios con diferentes grados de movimientos, tamaños de manos... etc.

El guante ha sido fabricado utilizando la tecnología de circuito impreso flexible. Se trata de una estructura multicapa a ocho capas. La circuitería en el lado del dedo se ha limitado a los sensores y componentes de montaje superficial pasivos de un número tamaño 0402.

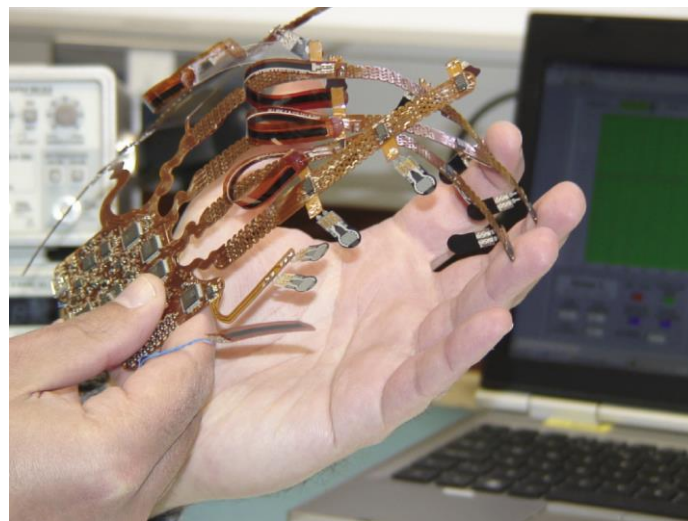


Fig. 2.14. Smart Sensor Glove

Minimizar el estrés bajo flexión de los dedos, la estructura de la FPC permite grandes deformaciones sin fractura, proporcionando alta flexibilidad, robustez y cierto grado de capacidad de estiramiento.

CAPÍTULO 3: ESPECIFICACIONES DE CIRCUITO

Una vez conocida la situación actual de los circuitos flexibles, en este capítulo, se va a describir las especificaciones del sistema que se quiere desarrollar. Se describen los bloques que componen el circuito y la elección de los componentes electrónicos, para, por último realizar, un esquemático del circuito en OrCad Capture CIS.

3.1 Diagrama de bloques

Como se ha descrito en el primer capítulo de la memoria, el sistema debe ser flexible para poder adaptarse a la curvatura de un brazo, es por ello de la elección de tecnología flexible. Este sistema debe recoger la información que proviene de tres sensores. Esta información viene dada en forma de carácter analógico, y debe ser entregada en forma digital por medio de un bus CAN.

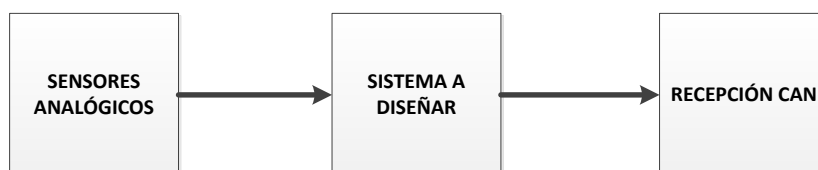


Fig. 3.15. Diagrama de requisitos de producto

Para poder interpretar la información analógica a la entrada del sistema y dar una salida digital a través de un bus CAN es necesario realizar una conversión analógica digital, para lo cual se empleará un microcontrolador. El microcontrolador precisará de un bloque oscilador y un bloque que permita la programación del mismo. Además, éste microcontrolador está alimentado con 3,3 Vcc, mientras que la alimentación que proviene del resto del sistema es de 5Vcc, por lo que precisa de un bloque de regulación y otro bloque de desacoplo de dicha alimentación. La información analógica de los sensores debe ser adaptada a través de unos divisores de tensión, y la información digital debe ser procesada por medio de un transceptor CAN. Con ello, queda el siguiente diagrama de bloques.

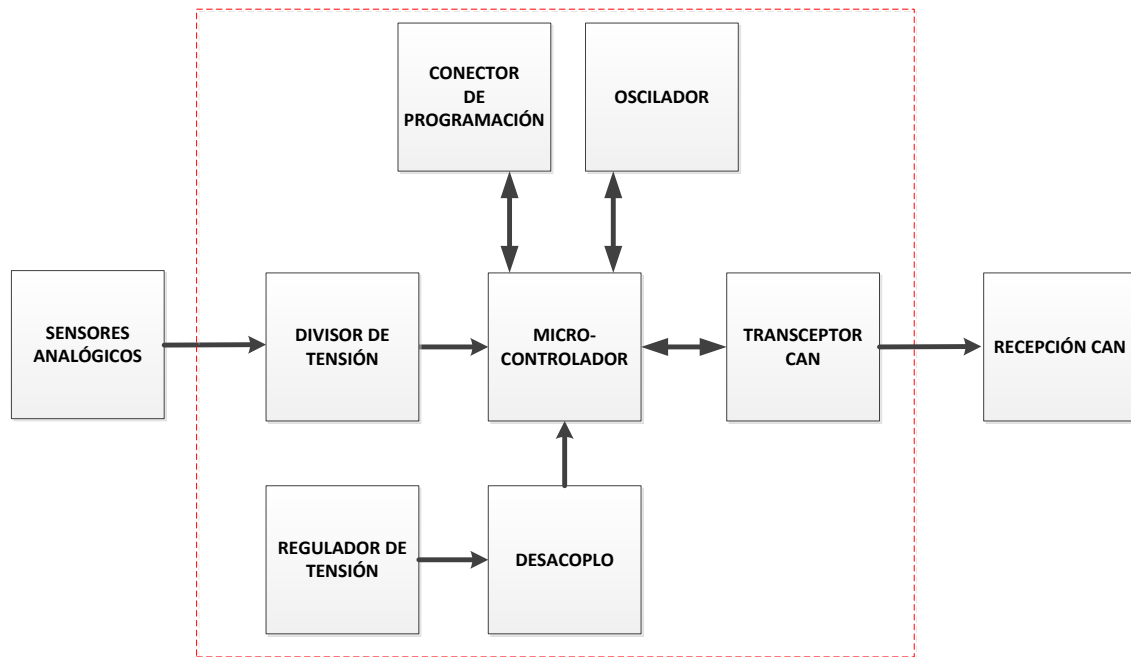


Fig. 3.16. Diagrama de bloques del sistema

3.2 Componentes del circuito

Siguiendo el diagrama de bloques anterior se hace necesaria la elección de los componentes de cada bloque. Como regla general para la elección de estos componentes se debe cumplir que sean de bajo coste y que puedan ser distribuidos por RS Admidata o Farnell. Que puedan operar en temperatura entre -20°C y 80°C , y que cumplan con la normativa RoHS [10]. Dicha normativa, en líneas generales, restringe el uso de materiales peligrosos en equipos electrónicos (Plomo, Mercurio, Cadmio, CromoVI, PBB y PBDE).

Otro aspecto a tener en cuenta es que el tamaño de los componentes sea reducido, para que la PCB ocupe el menor espacio posible. Además, si es posible, se elegirán componentes SMD de montaje superficial. Los componentes SMD (*Surface Mount Device*) son soldados en la misma cara en la que son montados, por lo que no es necesario realizar agujeros pasantes para la inserción de éstos.

3.2.1 MICROCONTROLADOR STM32F103C8T6

Para la adquisición y envío de datos se ha optado por utilizar un microcontrolador, por las siguientes razones:

- Para este diseño, cuyo requerimiento en tareas computacionales es pequeño, se descarta el uso de un microprocesador.
- Se requiere que incorpore comunicación CAN y pocas líneas de Entrada/Salida, por lo que el uso de la FPGA ya no es factible.
- En relación al Proyecto que se trata en este documento, las necesidades del microprocesador no son muy exigentes, ya que no es necesario realizar múltiples tareas ni operaciones excesivamente complejas.

De este dispositivo cabe destacar que tiene una capacidad de almacenamiento alto y un coste reducido, y su tamaño es considerablemente pequeño, siendo éstas algunas de las características que se están buscando para el desarrollo de este TFG.

Después de haber estudiado y valorado las distintas opciones existentes en el mercado se opta por elegir el microcontrolador STM32F103C8T6 (STMicroelectronics, Genova, Italia). Se trata de un microcontrolador de 48 pines de 32 bits y montaje superficial (*Fig. 3.17*) que pertenece a la familia STM32F103, la cual presenta una orientación clara al logro de un reducido consumo, y presenta comunicación CAN y conversores analógico/digitales, requisito imprescindible para el desarrollo de este TFG [Anexo1]. Además esta familia de microcontroladores es la usada por Antonio Flores Caballero por lo que facilitará el trabajo con este componente.

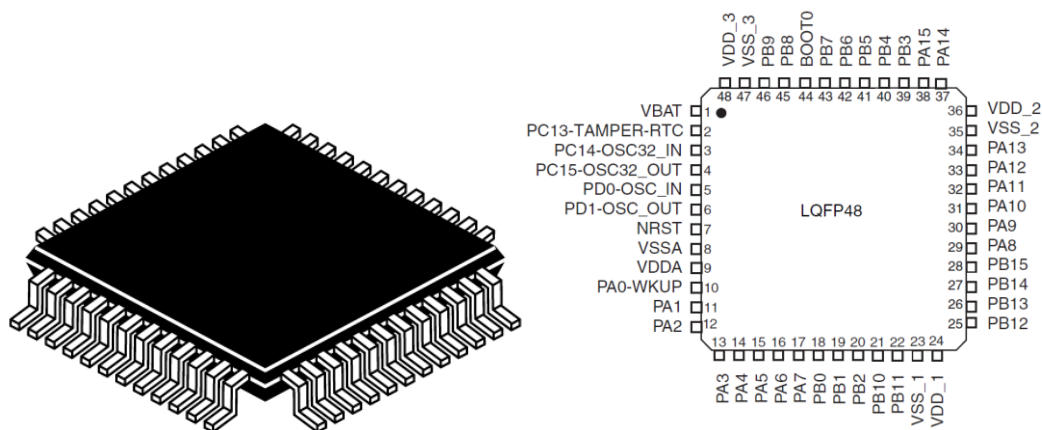
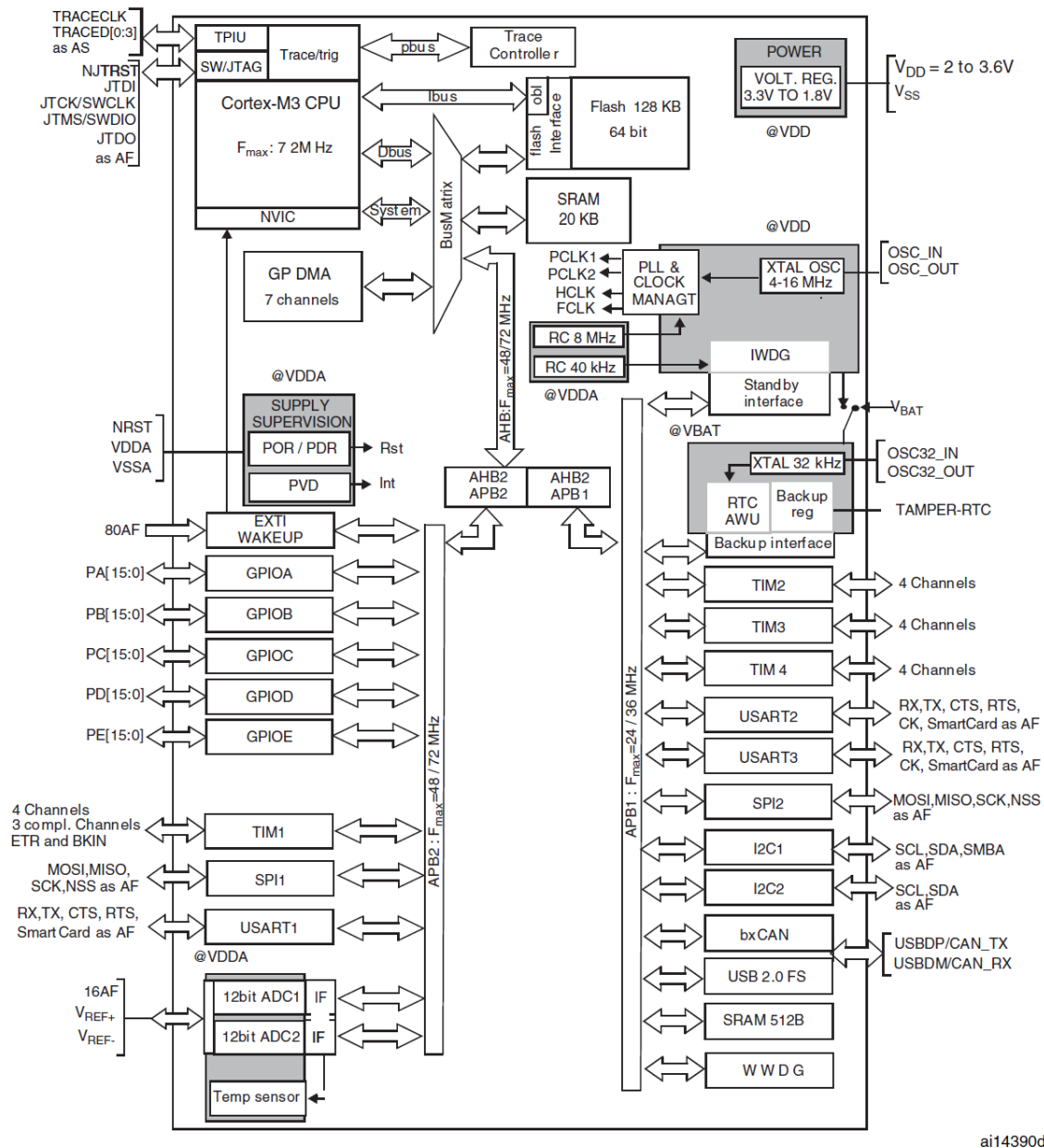


Fig. 3.17.

STM32F103C8T6

Esta familia de microcontroladores combina este reducido consumo con una gran eficiencia dando lugar a un gran ahorro energético. En tecnologías CMOS como ésta, parte de la energía se emplea en la carga y descarga de pequeñas capacidades intrínsecas a dicha tecnología. Los microcontroladores de la familia STM32F103 han sido diseñados con una tecnología propietaria, que al ser de dimensiones menores, reduce las capacidades de los nodos reduciendo por tanto la energía consumida.

En la siguiente figura (Fig. 3.18) se muestra el diagrama de bloques del microcontrolador donde se exponen todos los componentes internos y periféricos que contiene:



ai14390d

Fig. 3.18. Bloques STM32F103C8T6

Las principales características del microcontrolador STM32F103C8T6 se podrían resumir en:

- Diseño para consumo muy bajo de potencia. Consumo de potencia nulo en periféricos que no se usan. Dispone de hasta seis modos de bajo consumo disponibles.
- Cumple con la normativa RoHS.
- Dimensiones de 7.2 x 7.2 x 1.45 (mm).
- Sistema de reloj avanzado y flexible (múltiples fuentes de reloj internas y externas). Los relojes pueden ser conmutados y ajustados en frecuencia dependiendo de las necesidades.
- Fuente de alimentación de 2 V a 3.6 V.
- Rango de funcionamiento de temperatura de -40°C a 85°C.
- Convertidores Analógico-Digital: 2 (10 x 12 bits).
- Memoria programable de 64 kB.
- Memoria RAM de 20 kB.
- Frecuencia de Reloj: 72MHz.
- Comunicaciones Serie: 2xSPI, 2xI2C, 3xUSART, USB, CAN.
- Detector de voltaje programable (PVD).
- Oscilador externo e interno.
- Diseñado para desarrollo.
- Arquitectura ARM Cortex-M3.

ARM Cortex-M3

El micro STM32F103C8T6 cuenta con una arquitectura ARM Cortex-M3. Esta arquitectura presenta un gran rendimiento computacional mientras que alcanza una optimización y reducción de la energía consumida, tanto dinámica como estática.

Esta arquitectura de 32 bits presenta una mayor densidad de código que sus predecesoras de 8 y 16 bits, permitiendo una reducción en los requerimientos de memoria y maximizando el uso de la memoria Flash integrada.

Dentro de las ventajas de la arquitectura Cortex-M3 cabe destacar 3 elementos principales, la capacidad de gestión de interrupciones a través del NVIC (*Nested Vectored Interrupt Controller*), la MPU (Unidad de Protección de Memoria) que mejora la fiabilidad definiendo los atributos de memoria por diferentes regiones de la misma, y el CMSIS que permite una capa de abstracción adicional al usuario.

Además de estas 3 características principales, podemos destacar de la arquitectura ARM Cortex M3 los siguientes aspectos:

- Su alto Rendimiento
- Los buses de datos y de instrucción son independientes, lo que permite realizar accesos simultáneos a código y datos.
- Set de instrucciones Thumb-2. No es necesario cambiar entre estados ARM (32 Bits) y Thumb (16 bits), por lo que se reducen los ciclos de instrucción y el tamaño del programa. Muchas instrucciones, como la multiplicación son de un solo ciclo.

- Gracias al juego de instrucciones Thumb-2, Cortex-M3 ofrece mayor densidad de código y reduce los requerimientos de memoria.
- Cortex-M3 implementa relojes que pueden operar a más de 100 MHz. Además, tiene una relación reloj por instrucción (CPI) mejor que el resto de procesadores.
- Funciones Avanzadas en el Manejo de Interrupciones gracias al NVIC:
 - Gestión de 240 interrupciones.
 - El estado del procesador se guarda automáticamente.
 - El NVIC puede programar la prioridad de interrupciones individualmente. Maneja hasta 255 niveles de prioridad.
 - Dispone de una NMI (*NonMaskeable Interrupt*) que garantiza la ejecución del manejador asociado a esta interrupción. Esto es importante en aplicaciones de seguridad críticas
- Bajo Consumo de Energía
 - Es óptimo para diseños de bajo consumo
 - Soporta diversos modos de ahorro de energía.

Interfaces de comunicación

El microcontrolador STM32F103C8T6 cuenta, gracias a las ventajas de la arquitectura Cortex-M3, con diversos medios para establecer comunicaciones con otros dispositivos. A continuación se presentan los cuatro componentes que permiten estas comunicaciones

- BUS I2C: Puede operar hasta dos buses I2C, en modo master o esclavo. Pudiendo soportar modos estándar y rápidos. Dispone de una generación/verificación CRC embebida. Los movimientos de memoria pueden ser gestionados por el DMA y soportan SM Bus 2.0/PM Bus.
- USART (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver Transmitter): Una de las interfaces se puede comunicar a 4.5 Mbit/s y la otra a 2.5 Mbit/s. Todas las USART pueden ser usadas con el controlador de DMA.
- USB (Universal Serial BUS): dispone de un USB compatible con el USB de 12 Mbit/s. El interface USB implementa el interface de máxima velocidad (12 Mbit/s)
- SPI (Serial peripheral interface): Pueden operar hasta dos SPI a 18 Mbit/s en modo master y esclavo.
- CAN (Controller area network): es compatible con las especificaciones 2.0A y B (activo) con una tasa de bits de hasta 1 Mbit/s. Se puede recibir y transmitir tramas estándar con identificadores de 11 bits, así como marcos extendidos con identificadores de 29 bits. La comunicación CAN se describirá de manera más detallada en el apartado posterior.

Convertidor analógico/digital

Como su nombre indica es el encargado de transformar una señal analógica (nivel de tensión) en un valor digital equivalente.

El micro STM32F103C8T6 dispone de solo dos ADC con 16 canales. Cada canal es capaz de recibir una señal distinta y transformarla. Este ADC cuenta con una resolución de 12 bits, es decir, los valores transformados estarán comprendidos entre 0 y 4096.

Puede trabajar en modo *Single Shot* o modo *Scan*. En el modo de *Scan* (escaneado), la conversión automática se lleva a cabo en un grupo de entradas analógicas.

Además otras funciones lógicas embebidas en el ADC permiten:

- Muestra simultánea y mantenimiento.
- Muestra de *Interleaved* y mantenimiento.
- Derivación individual

El ADC puede ser servido por el controlador DMA. Dispone de un *watchdog* (vigilancia) que permite un seguimiento muy preciso de la tensión convertida de uno, algunos o todos los canales seleccionados, generando una interrupción cuando el voltaje convertido está fuera de los umbrales programados.

Descripción de los pines

Una vez descrita la estructura interna del microcontrolador que afecta el desarrollo de este TFG, queda por esclarecer la interrelación que existe ente el microcontrolador y el resto de los componentes del sistema. La siguiente tabla (*Tabla 3*), muestra los pines del STM32F103C8T6 que son usados y para qué son utilizados.

Nº de PIN	Nombre	Tipo	Función	Defecto	REMAP	UTILIZACIÓN
5	OSC_IN	I	OSC_IN		PD0	Oscilador patilla 2
6	OSC_OUT	O	OSC_OUT		PD1	Oscilador patilla 1
8	V _{SSA}	S	V _{SSA}			GND
9	V _{DDA}	S	V _{DDA}			Alimentación 3V3
10	PA0-WKUP	I/O	PA0	ADC12_IN0		Entrada divisor de tensión 1
11	PA1	I/O	PA1	ADC12_IN1		Entrada divisor de tensión 2
12	PA2	I/O	PA2	ADC12_IN2		Entrada divisor de tensión 3
23	V _{SS_1}	S	V _{SS_1}			GND
24	V _{DD_1}	S	V _{DD_1}			Alimentación 3V3
32	PA11	I/O	PA11	CANRX		Recepción CAN
33	PA12	I/O	PA12	CANTX		Transmisión CAN
34	PA13	I/O	JTMS/SWIO		PA13	Programación
35	V _{SS_2}	S	V _{SS_2}			GND

36	V _{DD_2}	S	V _{DD_2}			Alimentación 3V3
37	PA14	I/O	JTCK/SWCLK		PA14	Programación
47	V _{SS_3}	S	V _{SS_3}			GND
48	V _{DD_3}	S	V _{DD_3}			Alimentación 3V3

Tabla 3: Pinout microcontrolador

El resto de pines y su función aparecen recogidos en el Anexo2.

3.2.2 OSCILADOR

Para el bloque oscilador en este caso se emplea un cristal de cuarzo de 8 MHz.

Cristal de cuarzo

El cristal de cuarzo presenta un efecto piezoeléctrico, es decir, aplicando un voltaje en las caras opuestas de una pieza de cuarzo, éste cambia su forma. Aplicando un voltaje AC, este cristal de cuarzo es capaz de vibrar a la frecuencia de este voltaje. En función de las dimensiones y del corte del cristal, oscila a una determinada frecuencia.

Un circuito oscilará si tiene una realimentación positiva y una ganancia mayor que 1. Con un cristal en serie, como único elemento dependiente de la frecuencia, la frecuencia de oscilación será la fundamental del cristal de cuarzo. Un cristal de cuarzo siempre intenta oscilar a su frecuencia fundamental y debe ser forzado para oscilar en frecuencias armónicas.

Teoría de la oscilación

Un oscilador controlado por cristal de cuarzo puede ser considerado como compuesto de un amplificador y de una red de realimentación que coge parte de la señal de salida y la aplica de nuevo a la entrada del amplificador.

Elección del oscilador

En un cristal de cuarzo intervienen características eléctricas y mecánicas. Si al cuarzo se le aplica una presión mecánica, genera un campo eléctrico en dirección perpendicular a la presión. Este efecto es conocido como piezoeléctrico y es la base de los cuarzos que se usan en manufactura electrónica [11].

Colocando un cuarzo entre dos electrodos y aplicando una tensión cambiante, el cristal vibra a esa frecuencia. La máxima amplitud de la vibración se obtiene cuando la frecuencia de la tensión aplicada coincide con la frecuencia de resonancia del cristal. Los osciladores con cristal de cuarzo, oscilan a la frecuencia de resonancia del cristal.

Una de las características más deseables en un cristal, es su factor de calidad Q. Es una medida de cuanta energía se pierde, debido a la vibración. En términos mecánicos Q es igual:

$$Q = 2\pi \left[\frac{\text{Energía almacenada por ciclo}}{\text{Energía perdida por ciclo}} \right] = \frac{1}{2\pi \cdot f_s \cdot R_1 \cdot C_1}$$

Los cristales con alto Q tienden a ser increíblemente estables. Las únicas variaciones de frecuencia asociadas al cristal tienen que ver con las variaciones de temperatura y con el envejecimiento. La temperatura afecta con 100 ppm (partes por millón) en el rango de funcionamiento, mientras que el envejecimiento aporta unos 5 ppm por año.

Cuando seleccionamos un cristal, debemos considerar la precisión que nuestro sistema debe tener. La selección del cristal y el diseño del oscilador deben ser equilibradas el uno con el otro. Estos factores trabajan juntos, influenciando la precisión de frecuencia y el coste. A mayor precisión, mayor coste.

Existen cuatro parámetros que juegan un papel importante en la precisión del sistema:

- 1.- Tolerancia en frecuencia.
- 2.- La estabilidad en frecuencia
- 3.- El envejecimiento
- 4.- La capacidad de carga

Cada parámetro puede ser ajustado sin influencia de los otros tres. Esta independencia de parámetros hace que la personalización de cristales sea atractiva.

A pesar de todo, la personalización de cristales tiene un incremento de coste respecto a estándares.

La tolerancia en frecuencia es el primer parámetro que determina el objetivo de precisión. Indica, a la temperatura ambiente de 25°C, cuán lejos está el cristal actual respecto a su frecuencia especificada. La mayor parte de los cristales está especificada en partes por millón.

La estabilidad en frecuencia es el segundo parámetro para conseguir la correcta temporización. Es una función de la temperatura y del tipo de corte del cristal. Los tipos más corrientes de cristal son AT y BT sus curvas de estabilidad son distintas y deben ser tenidas en cuenta cuando se diseña el sistema.

Si un sistema usa un cristal AT, expuesto a fluctuaciones de temperatura, las variaciones de frecuencia tienden a compensarse entre sí, a lo largo del tiempo. De todas formas, siempre un error existirá al no operar exactamente a 25°C

El cristal BT es típico a bajas frecuencias. Los incrementos y decrementos de temperatura causan decrementos en la frecuencia de resonancia del cristal. A diferencia del cristal AT, el BT; no compensa las variaciones de frecuencia con el tiempo.

El envejecimiento (*aging*) se refiere al proceso acumulativo de cambio en la frecuencia, experimentado en el cristal de cuarzo a través del tiempo. Los factores que afectan al envejecimiento son: un excesivo nivel de amplificador, los efectos térmicos, las fatigas de las conexiones y del soporte y la contaminación interna por desprendimiento de partículas. Un buen diseño, con el mínimo nivel de amplificación y dentro del rango de temperatura, reduce la tasa de envejecimiento.

La capacidad de carga es el cuarto parámetro a tener en cuenta. En circuitos resonantes paralelos existen una capacidad de carga. Si la capacidad de carga de un circuito no coincide exactamente con la capacidad de carga del cristal, habrá un desplazamiento de la frecuencia de resonancia. Una característica interesante de los cristales de cuarzo es que todos estos parámetros son independientes entre sí. Cada uno puede ser ajustado, sin afectar a los otros.

Teniendo en cuenta los parámetros anteriores, y los requisitos generales, después de analizar distintas opciones, se ha escogido el cristal ABM3-8.000MHZ-D2Y-T fabricado por Abracon, y distribuido por la empresa Farnell (Código: 2101329).



Fig. 3.19. Cristal ABM3-8.000MHZ-D2Y-T

Se trata de un cristal de 8 MHz de frecuencia, con una tolerancia de frecuencia de ± 20 ppm. La capacidad de carga es de 18pF, la estabilidad de frecuencia de ± 30 ppm y el envejecimiento de ± 5 ppm [Anexo3]

Además cumple con los requisitos establecidos al inicio de este apartado: RoHS, SMD, temperaturas de trabajo desde -40°C a 85°C , su tamaño es reducido (5mm x 3.2mm) y su coste es relativamente bajo (1.93€). Es por ello por lo que se escoge este componente en lugar de otra alternativa.

3.2.3 REGULADOR

El regulador es el bloque destinado a compensar las variaciones que se producen en la magnitud a controlar, en este caso, la tensión de salida de 3,3 Vcc. Para ello, se encarga de generar una señal de tensión continua a partir del nivel de error.

Todos los reguladores presentan la misma estructura de amplificador diferencial, siendo los valores de las impedancias Z1 y Z2 los que cambian según se trate de un tipo de regulador u otro (Fig. 3.20).

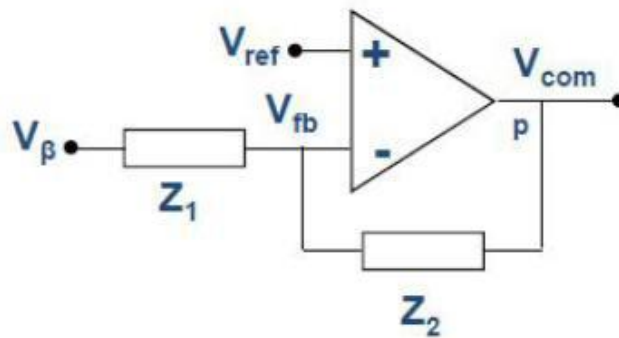


Fig. 3.20. Estructura de un regulador

Por lo tanto, el cálculo de su tensión de salida resulta sencillo si se aplica superposición a las dos tensiones de entrada:

$$V_{com} = -\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)V_{\beta}\left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right)V_{ref}$$

En el caso del sistema de éste TFG se necesita un regulador que reciba una tensión de 5Vcc y lo transforme en una salida fija de 3.3Vcc. Tras hacer un estudio de las distintas soluciones existentes en el mercado se ha decidido utilizar el regulador de baja caída TPS71733DCKT de la empresa Texas Instruments, distribuido por Farnell (Código: 1755491). Dicho regulador puede recibir una tensión de entrada entre 2.5V y 6.5V, otorgando una salida fija de 3.3V, dando con ello un intervalo de seguridad ante posibles perturbaciones en la entrada de 5V [Anexo4].

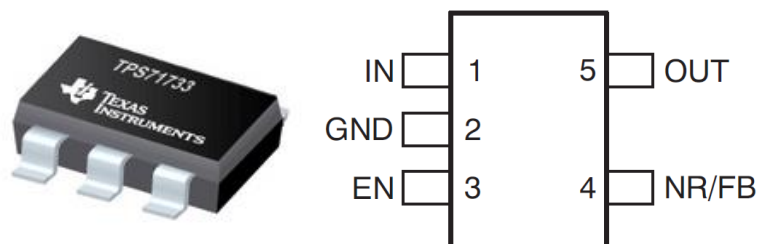


Fig. 3.21. Regulador TPS71733DCKT

El regulador TPS71733DCKT es un regulador que ofrece un alto factor de rechazo a la fuente de alimentación (PSRR) mientras mantiene una baja corriente de tierra (45uA). El PSRR es el término utilizado para describir la cantidad de ruido de una fuente de alimentación que un dispositivo en particular puede rechazar.

Este regulador está diseñado para conseguir un amplio ancho de banda y un gran lazo de ganancia, que resulta en un aumento de PSRR (hasta 1MHz). Proporciona un pin de reducción

de ruido para evitar el ruido generado por la referencia de la banda prohibida y mejorar el PSRR.

La salida se estabiliza utilizando un condensador de 1 μF , y aunque no es necesario un condensador para la entrada, el fabricante recomienda poner uno entre 0.1 y 1 μF a la entrada de alimentación, quedando el diagrama mostrado en la siguiente figura (Fig. 3.22).

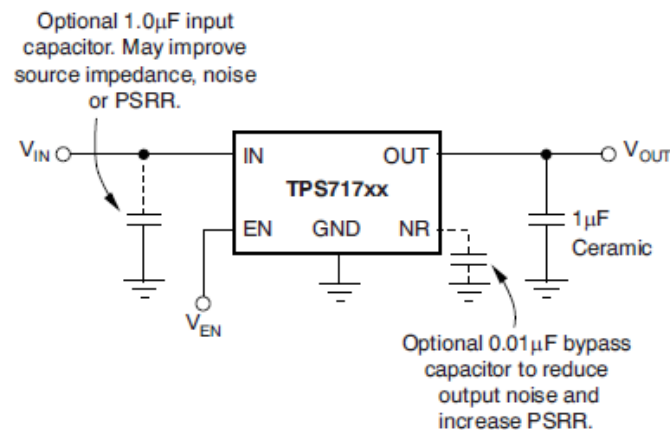


Fig. 3.22. Circuito de aplicación TPS71733DCKT

3.2.4 DESACOPLO

Para el desacoplo de la entrada de alimentación del micro se utilizan una serie de condensadores de desacoplo.

Condensadores de desacoplo

Los sistemas digitales de alta velocidad de conmutación generan ruido en las líneas y en los planos de alimentación, debido a las rápidas solicitudes de corriente por parte de los circuitos integrados. Estas solicitudes de corriente pueden ser debidas tanto a circuitos internos como a las señales de la salida del circuito integrado, con tiempos, de subida y bajada, muy rápidos. Cuando las líneas de alimentación no pueden suministrar corrientes a tal velocidad, debido normalmente a su inductancia parásita, se produce una caída temporal de esa tensión de alimentación hasta que la inductancia deje de oponerse a ese cambio rápido de corriente. Esta caída de tensión puede producir cualquier alteración en el buen funcionamiento del circuito integrado. Una simple y fácil solución a este problema es colocar un condensador de desacoplo en la entrada de alimentación. Este condensador almacena una carga eléctrica que es liberada cuando el circuito integrado solicita rápidamente una corriente extra [11].

El condensador de desacoplo sirve además, como camino de retorno a las corriente de alta frecuencia, desde el plano o las línea de alimentación hasta alcanzar el plano de masa. Si estos condensadores no están presentes, las corrientes de alta frecuencia retornarán por lugares alejados, produciendo bucles y, por tanto, radiación.

La necesidad de un buen sistema de desacoplo es debido a la constante reducción de tiempos de conmutación, al uso de circuitos integrados (CIs) más sensibles y al aumento de las frecuencias del reloj.

A pesar de que el desacoplo y *bypass* frecuentemente se confunde en un solo concepto, existen ciertas diferencias. En los circuitos también se utilizan condensadores de reserva.

Desacoplo: es la práctica de añadir una baja impedancia, a los caminos de retorno de los transistores, desde el origen hasta la masa. Eliminan la energía de radio frecuencia (RF) generada por la alta frecuencia de conmutación de los CIs y proveen un mantenimiento local de las tensiones de alimentación del CI, evitando que caiga la misma por los picos de consumo de corriente.

Bypassing: es la práctica de romper el acoplamiento entre diferentes porciones de los sistemas y circuitos, para asegurar su adecuado funcionamiento. Estos condensadores eliminan la energía de RF no deseada, que se acopla mediante componentes, pistas y cables, a zonas susceptibles.

Reserva: estos condensadores mantienen constante el nivel de corriente continua y otorga la corriente a los componentes, cuando todos los pines de salida de uno o varios CI conmutan al mismo tiempo. Los condensadores reserva, localizados en áreas alejadas de la fuente de alimentación evitan la caída de tensión en cada zona, mientras que los de desacoplo y de paso evitan la propagación de las corrientes de RF, desde una are a otra.

Consideraciones generales

Un sistema sin técnicas de desacoplo puede crear serias perturbaciones en la líneas de planos de alimentación y causar fallos. Existen unos cuantos puntos que deben ser tenidos en cuenta cuando se desacoplan las líneas o los planos de alimentación.

- Tipo de condensador
- Emplazamiento
- Efecto de la carga en la salida
- El valor del condensador

Tipo de condensador

Para desacoplar una línea de alimentación o los planos de alimentación, se requieren condensadores con muy baja inductancia. Es por este motivo que los condensadores multicapa cerámicos son mejor que otros para ser utilizado para desacoplo, debido a su baja inductancia. El dieléctrico utilizado en los condensadores también es importante, ya que se refleja en su impedancia total. El NP0 es el que mejor comportamiento tiene, el X7R tiene un comportamiento aceptable y el Z5U es el peor de todos. La siguiente figura muestra la impedancia en función del dieléctrico, para condensadores del mismo valor, a la frecuencia de auto-resonancia (*Fig. 3.23*).

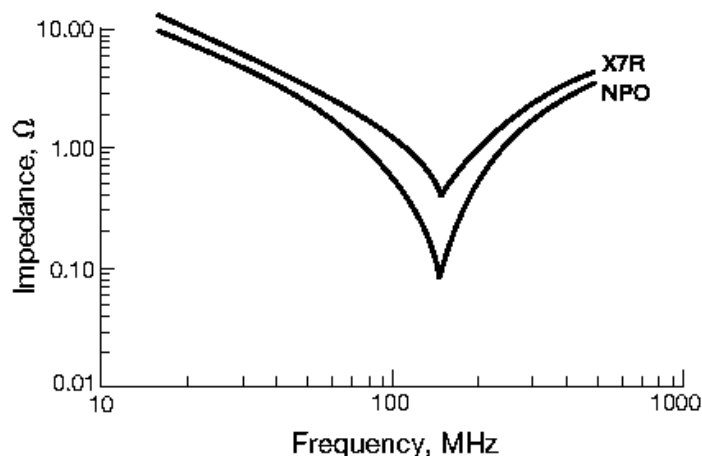


Fig. 3.23. Impedancia en función del dieléctrico

En el caso de este trabajo de frecuencia es de 8MHz por lo que el uso de un dieléctrico y otro es independiente. Sin embargo, se ha decidido el empleo de condensadores X7R.

El emplazamiento

Para mantener la inductancia lo más baja posible y mantener estable la tensión los condensadores de desacoplo deben estar colocados lo más cerca posible del CI.

Este aspecto no es de importancia a la hora de hacer el esquemático, pero va ser tenido en cuenta para el diseño físico [CAPÍTULO 4]

Efecto de la carga a la salida.

Las cargas capacitivas en las salidas combinada con un incremento de la frecuencia de conmutación, conlleva un aumento en los transitorios de corriente y una posible oscilación de la tensión de alimentación. Si la salida es puramente resistiva, el incremento en la frecuencia no afecta a los flancos de subida y bajada de la señal de salida, por eso no incrementa las perturbaciones en las líneas de alimentación.

Valor del condensador

La cualidad más importante es la de suministrar corriente instantánea cuando se necesita. Existen dos formas de calcular el valor de un condensador de desacoplo, para un determinado CI.

1.- La cantidad de corriente necesaria para conmutar una salida desde cero a uno (I), el número de salidas conmutado (N), el tiempo requerido por el condensador para suministrar corriente (Δt) y la caída de tensión que se puede tolerar (ΔV), deben ser conocidos. La siguiente ecuación puede ser usada.

$$C = \frac{I \cdot N \cdot \Delta t}{\Delta V}$$

2.- Algunos fabricantes de condensadores especifican el *slew rate* máximo. Esto permite calcular la corriente máxima que pueden suministrar un condensador.

En este caso se han utilizado el valor de los condensadores recomendados por el fabricante que se recogen en las hojas de datos de cada CI.

3.2.5 DIVISOR DE TENSIÓN

Dado que el rango de voltajes de salida de los sensores es mayor que lo que el microcontrolador puede admitir, es necesario adecuar esos valores. Esto es posible por medio de divisores de tensión. Un divisor de tensión (Fig. 3.24) se compone de dos resistencias, R_1 y R_2 , conectadas en serie.

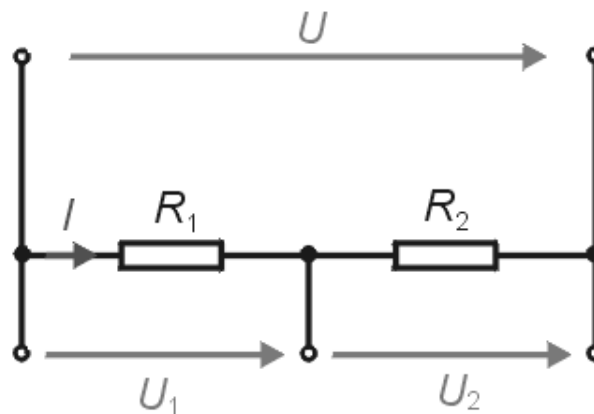


Fig. 3.24. Distribución de divisor de tensión

En los bornes externos se aplica la tensión de alimentación U , proveniente de los sensores, la cual se divide en las tensiones U_1 y U_2 . De acuerdo con la ley de división de tensión, es válido lo siguiente:

$$U_1 + U_2 = U$$

La intensidad de corriente en el divisor, de acuerdo con la ley de Ohm, tiene el siguiente valor:

$$I = \frac{U \cdot R_1}{R_1 + R_2}$$

Y la caída de tensión en las resistencias es iguala:

$$U_1 = I \cdot R_1 = \frac{U \cdot R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_2 = I \cdot R_2 = \frac{U \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Aplicando esta teoría se crea un sistema de medida conociendo el rango de voltajes del microcontrolador y el de los sensores. El sistema de medida se diseña mediante tres divisores de tensión, uno por cada sensor, formado entre las resistencias de referencia y la resistencia interna de cada sensor. Las resistencias de referencias serán tipo SMD de tamaño 0402, de la familia CRCW0402 fabricada por Vishay, cuyos valores obtenidos para las resistencias de referencia son los siguientes:

R Sensor de presión= 18 K Ω

R Sensor de temperatura= 10 K Ω

R Sensor de humedad= 260 K Ω

En el caso del sensor de humedad se opta por la opción de poner dos resistencias en serie de 130K Ω .

3.2.6 COMUNICACIÓN CAN

CAN Bus es un protocolo de comunicación en serie desarrollado por Bosch en los años 80 para el intercambio de información entre unidades de control electrónicas del automóvil. CAN o Controller Area Network (*Red de área de control*) es un protocolo abierto para uso industrial y concebido como protocolo de alta seguridad.

Se trata de un sistema multiplexado que permite compartir una gran cantidad de información entre distintos módulos de control conectados a la red, lo cual provoca una reducción importante en el número de sensores utilizados y cables. De esta forma aumenta considerablemente las funciones

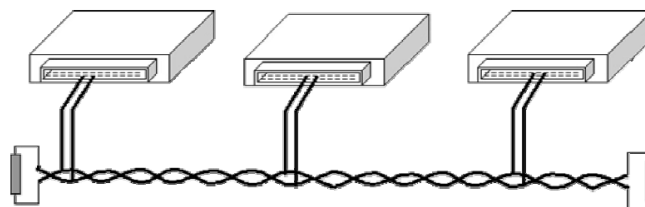


Fig. 3.25. Comunicación CAN

Características principales

- La información que circula entre las unidades de mando a través del bus son paquetes de 0 y 1 (bit) ,con una longitud limitada, y con una estructura definida de campos que conforman el mensaje
- Uno de esos campos actúa como identificador del tipo de dato que se transporta, de la unidad de mando que lo transmite y de la prioridad para transmitirlo respecto a otros. El mensaje no va direccionado a ninguna unidad de mando en concreto, cada una de ellas reconocerá mediante este identificador si el mensaje le interesa o no.
- Todas las unidades de la red puede ser transmisores y receptoras, y el número de módulos conectado a la red variable (dentro de unos límites).
- Cualquier módulo introduce un mensaje en el bus con la condición de que esté libre, si otra lo intenta al mismo tiempo el conflicto se resuelve por la prioridad del mensaje indicado por el identificador del mismo.
- El sistema está dotado de una serie de mecanismos que aseguran el mensaje es transmitido y recibido correctamente. Cuando un mensaje presenta un error es anulado y vuelto a transmitir de forma correcta (automáticamente), de la misma forma que un módulo con problemas avisa a los demás mediante el propio mensaje, si la situación no se soluciona, este módulo queda fuera de servicio pero el sistema sigue funcionando.

Estructura fundamental

La estructura fundamental del nodo CAN está compuesta de lo siguiente:

- Host-Processor: Elemento que se encarga de la “comprensión” de los mensajes recibidos y la elección de los mensajes a enviar. En este caso permanece fuera del sistema a diseñar.
- CAN-Controller: Se encarga de la recepción y envío de los mensajes. Básicamente, su función al momento del envío es almacenar la trama a transmitir y enviar los bits de la trama uno a uno. En la recepción se encarga de almacenar datos de la trama bit a bit y una vez completa interrumpe al *Host-Processor*.
- Transceiver (Transceptor): Suele estar integrado junto al CAN-Controller, se encarga de ajustar los niveles lógicos entre el CAN-Controller y el Bus físico, de implementar circuitos de protección para alisar en la medida de lo posible al CAN-Controller.

Transceptor CAN

Como ya hemos visto anteriormente, STM32F103C8T6 implementa un controlador Can integrado, y en este tipo de implementaciones el *transceiver* no está dentro del propio microcontrolador.

A pesar de que los *transceivers* pueden funcionar a diferentes tensiones, se escoge uno que pueda funcionar a 3.3 voltios, que es la tensión con la que se alimenta el microcontrolador. Aunque existe un gran número de posibilidades en el mercado, se ha escogido el

SN65HVD230D de Texas Instruments, distribuido por Farnell (Código: 1103105), ya que cumple con los requisitos deseados para el diseño [Anexo5].

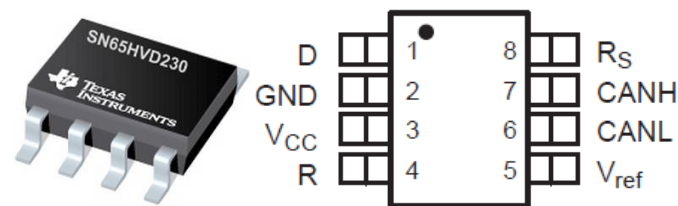


Fig. 3.26. Transceiver SN65HVD230

Se trata de un *transceiver* de ocho pines que está diseñado para proporcionar una capacidad de transmisión diferencial para el bus a una velocidad de hasta 1Mbps.

Cuenta con protección de la pérdida de la tierra, protección contra sobretensiones, protección de temperatura, así como protección de los transitorios de modo común.

Gracias su pin número ocho ofrece tres modos de funcionamiento diferentes: alta velocidad, control de pendiente, y modos de bajo consumo. El modo de alta velocidad de operación se selecciona mediante la conexión de la patilla a tierra, permitiendo que los transistores de salida del transmisor se enciendan y apaguen lo más rápido posible., sin limitación en la pendiente de subida y bajada. Las pendientes de subida y bajada pueden ser ajustadas mediante la conexión de una resistencia a tierra en la patilla, ya que la pendiente es proporcional a la corriente de salida de la clavija. Para el modo de bajo consumo es necesario el empleo de un procesador digital de señales o DSP (*Digital Signal Processor*).

Protector CAN

En este diseño también se emplea un protector de línea CAN, NUP2105LT1G, de la empresa ON Semiconductor, distribuido por RS Admidata (Código: 464-255) [Anexo6].



Fig. 3.27. Encapsulado NUP2105LT1G

Este C.I. está diseñado para proteger el transceptor Can de las ESD (Descargas Electroestáticas) y de otros eventos transitorios dañinos. El dispositivo proporciona protección bidireccional para cada línea de datos con un encapsulado SOT-23, dando una opción de bajo coste para

mejorar la fiabilidad del sistema y el cumplimiento de los requisitos EMI (Interferencias Electromagnéticas) de diseño.

La siguiente figura muestra un ejemplo de uso del componente en una línea de comunicación CAN.

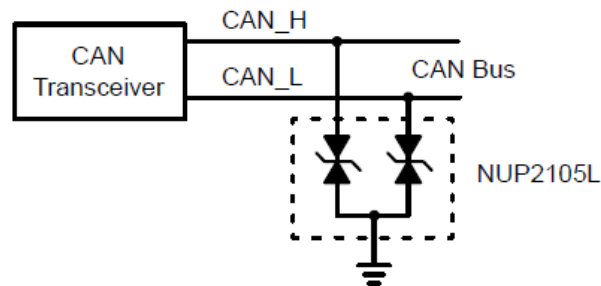


Fig. 3.28. Empleo de NUP2105LTG1 en comunicación CAN

3.2.7 CONECTORES

Para conectar los sensores a la tarjeta, así como para acceder a los pines de programación del micro, dar la alimentación de entrada o recibir la salida del transceptor CAN, en necesario el empleo de conectores. Se utilizaran cuatro conectores de la empresa Molex. Se trata de conectores de montaje superficial, una fila y paso 1.25mm. Para la comunicación CAN y para la entrada de alimentación de la tarjeta se emplea el conector 502386-0270 (Código RS: 660-1081) (*Fig. 3.29*). Para la programación del microcontrolador y la conexión de los sensores se utiliza el conector 502386-0470 (Código RS: 660-1088) mostrado en la (*Fig. 3.30*).

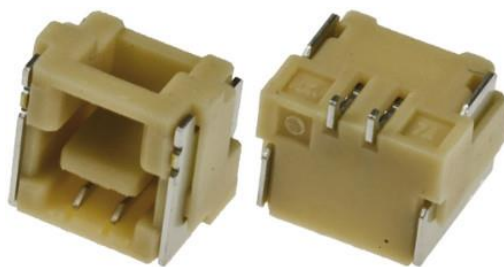


Fig. 3.29. Conector 502386-0270

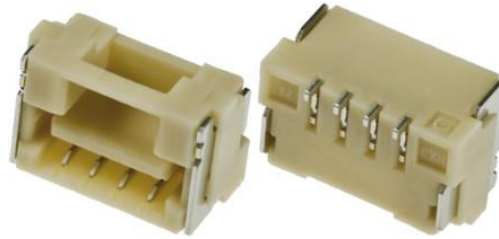


Fig. 3.30. Conector 502386-0470

Con estos conectores se termina con el proceso de elección de componentes y se puede proceder a diseñar el esquema del circuito.

3.3 Esquemático

Una vez seleccionados los componentes que forman los distintos bloques descritos en el apartado anterior, se procede a hacer la captura del esquemático. Para ello se emplea la herramienta OrCad Capture CIS.

Con captura de esquemas (*capture*) se entiende el proceso de descripción, mediante un dibujo de un circuito eléctrico. El dibujo del esquema puede incluir más de un simple diagrama de líneas, además puede incluir información sobre tiempos, cables, conectores, notas del usuario y valores necesarios por el resto de aplicaciones para la interpretación del mismo.

El flujo de trabajo para la captura del circuito es el siguiente:

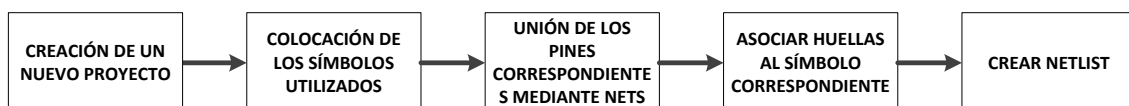


Fig. 3.31. Flujo de captura de esquemático

- Creación de un nuevo proyecto: se debe elegir si la captura se hace en una sola hoja, como es el caso que aplica a este trabajo, o en otro caso, utilizando modelo jerárquico en el que cada parte del circuito estará en una hoja diferente. Para ello es importante la utilización de puertos.

Los puertos son conexiones al exterior de la hoja, y realizan la labor de interfaz del circuito con el mundo exterior o con otra hoja. Los puertos pueden ser de entrada, de salida, o de entrada/salida, dependiendo de la dirección del flujo de la información.

- Colocación de los símbolos utilizados: los símbolos son cajas que se interconectan unas con otras en la hoja de diseño y representan un componente determinado. Cada componente estará identificado con un designador único.

Alguno de estos símbolos se encuentran recogidos en la librerías propias de OrCad, sin embargo, otros como es el caso de los componentes: NUP2105LT1G, STM32F103C8T6, SN65HVD230D y TPS71733DCKT; han de ser creados.

- Unión de los pines: el método clásico para la interconexión de los distintos símbolos de una hoja son las mallas o nets. Una malla en el esquema tiene una correspondiente inmediata con el circuito real, se trata de un cable físico que conecta un pin de un chip con un pin de otro, por ejemplo.
- Asociar huellas al símbolo correspondiente: una huella es la forma que tiene un determinado componente a la hora de colocarlo en una PCB. Algunos de los símbolos utilizados en las librerías de OrCAD ya lo tienen asociado, sin embargo, otros no lo tienen y sería necesario su diseño. El proceso de creación de huellas será descrito en el siguiente capítulo.
- Crear NetList: este fichero tendrá toda la información necesaria sobre componentes y sus conexiones para hacer posible el diseño de la PCB.

Siguiendo este procedimiento se crean los componentes y las uniones correspondientes a los bloques descritos en el apartado anterior [Anexo7]. Se muestra el esquemático resultante (Fig. 3.32).

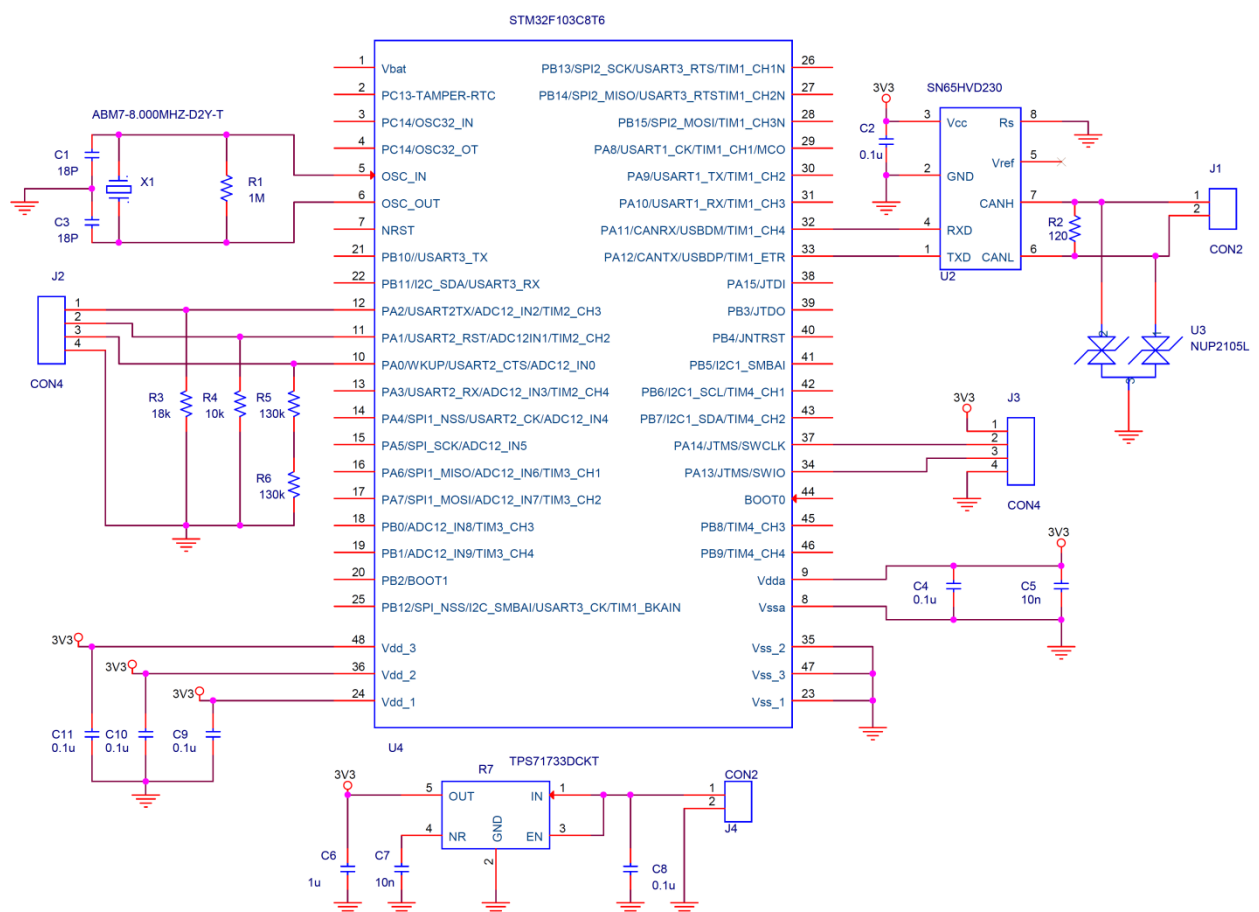


Fig. 3.32. Esquemático

En la siguiente figura (Fig. 3.33) se puede comprobar que esta captura de esquemático se corresponde con la distribución de bloques mostrada al inicio del capítulo en la Fig. 3.16.

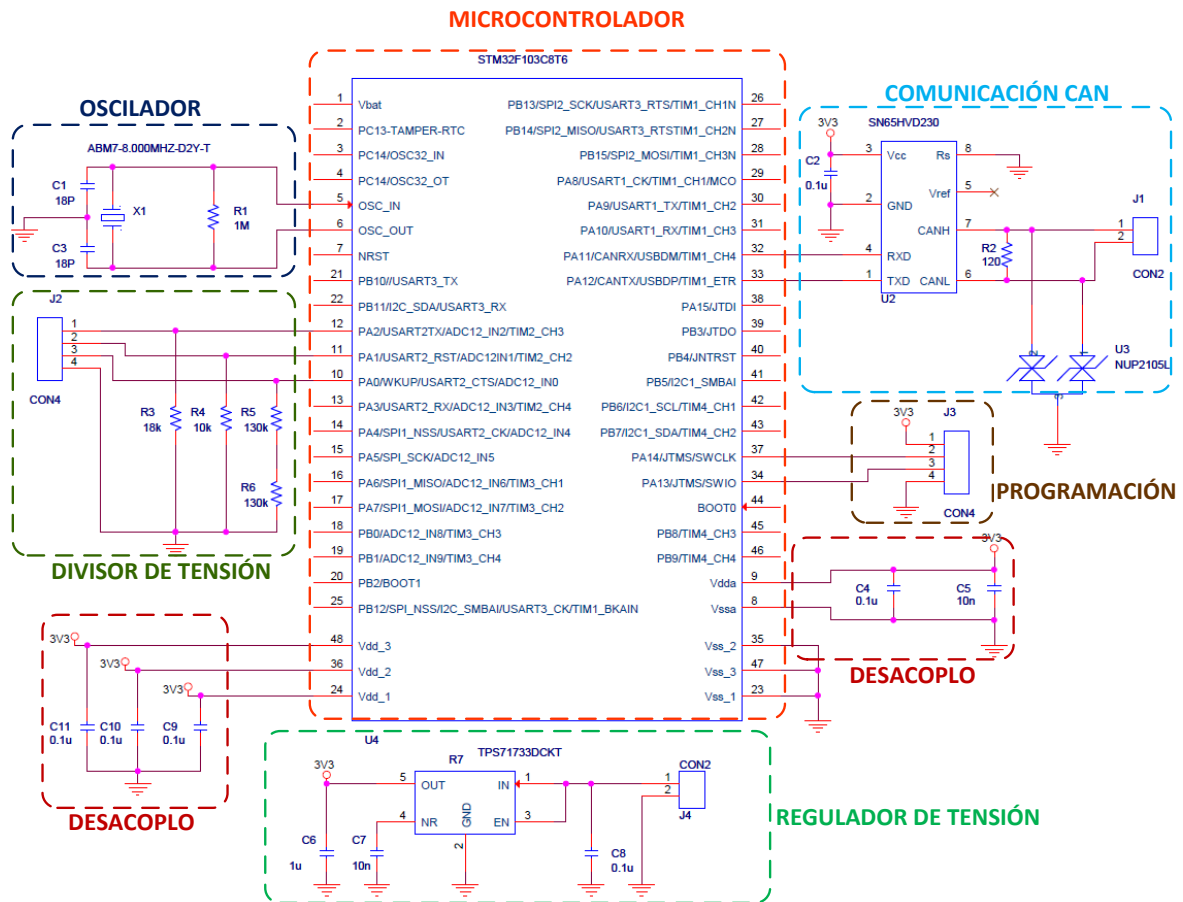


Fig. 3.33. Descripción de bloques del esquema

3.4 Lista de materiales

Por último, con toda la información recogida durante este capítulo, se crea la lista de materiales o BOM (*Bill Of Materials*) del sistema (Fig. 3.34). Dicha lista se puede encontrar en el Anexo8 y servirá para hacer el acopio de los componentes que irán montados en la tarjeta.

Lista de materiales FlexPrototype_V00								
Designador	Fabricante	Part Number	Distribuidor	Cod. Distribuidor	Cantidad	Valor	Precio	Precio total
C1, C3	TDK	CGA2B2C0G1H180J050BA	FARNELL	2210766	2	18 pF	0,068 €	0,136 €
C2, C4, C8, C9, C10, C11	TDK	C1005X7R1A104K050BB	FARNELL	1844124	6	0,1uF	0,008 €	0,048 €
C5, C7	AVX	0402ZC103KAT2A	FARNELL	2332546	2	10nF	0,081 €	0,162 €
C6	TDK	C1005X5R0J105K050BB	FARNELL	2346871	1	1uF	0,014 €	0,014 €
J1, J4	Molex	502386-0270	RS ADMIDATA	660-1081	2	-	0,461 €	0,922 €
J2, J3	Molex	502386-0470	RS ADMIDATA	660-1088	2	-	0,547 €	1,094 €
R1	Vishay	CRCW04021M00FKED	RS ADMIDATA	678-8923	1	1M	0,024 €	0,024 €
R2	Vishay	CRCW0402120RFKED	RS ADMIDATA	678-8731	1	120	0,015 €	0,015 €
R3	Vishay	CRCW040218K0FKED	RS ADMIDATA	678-8854	1	18k	0,015 €	0,015 €
R4	Vishay	CRCW040210K0FKED	RS ADMIDATA	678-4697	1	10k	0,027 €	0,027 €
R5, R6	Vishay	CRCW0402130KFKED	RS ADMIDATA	678-8765	2	130K	0,027 €	0,054 €
U2	Texas Instrument	SN65HVD230D	FARNELL	1103105	1	-	2,220 €	2,220 €
U4	STMicroelectronics	STM32F103C8T6	RS ADMIDATA	402-279	1	-	5,480 €	5,480 €
U3	ON Semiconductor	NUP2105LT1G	RS ADMIDATA	464-255	1	-	0,399 €	0,399 €
X1	ABRACON	ABM3-8.000MHZ-D2Y-T	FARNELL	2101329	1	-	1,930 €	1,930 €
R7	Texas Instrument	TPS71733DCKT	FARNELL	1755491	1	-	0,790 €	0,790 €
							13,330 €	

Fig. 3.34. Lista de materiales

CAPÍTULO 4: DISEÑO FÍSICO

En este capítulo se especifica el proceso de diseño físico del sistema, para el que se ha utilizado la herramienta OrCAD LayOut, y se enumera los distintos aspectos que se han de tener en cuenta para hacer el rutado de FPCs.

A continuación, se muestra el flujo de trabajo para el OrCAD Layout:

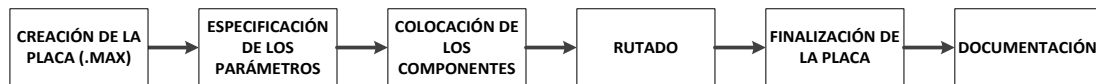


Fig. 4.35. Flujo de trabajo OrCAD Layout

- Creación de la placa: el archivo .MAX se obtiene a partir del NetList generado por OrCAD Capture.
- Especificaciones de los parámetros: se especifica la configuración de la tarjeta, incluyendo unidades de medición, cuadrículado y espaciado. En suma se puede crear el límite de la placa (Board Outline) y definir las capas, pads y vías.
- Colocación de los componentes: se utiliza la herramienta de componentes para colocar manualmente los componentes en la placa, previamente diseñados, de manera que se ahorre el mayor espacio posible y previendo como se hará el rutado para evitar cruce de pistas.
- Rutado de la placa: se puede trazar las pistas de la tarjeta de forma automática, aunque es recomendable hacerlo de forma manual, utilizando ángulos de 45º y evitando el cruce de pistas.
- Finalización de la placa: comprobación de posibles errores en cuanto a las reglas de diseño utilizando el DRC (Design Rule Check) y solución a los mismos.
- Documentos: creación de reportes.

4.1 Creación de la placa

Para poder crear la placa es necesario crea un archivo “.MAX”, que se obtiene a partir del NetList generado en OrCAD Capture, de un archivo “.TCH” propio de OrCAD.

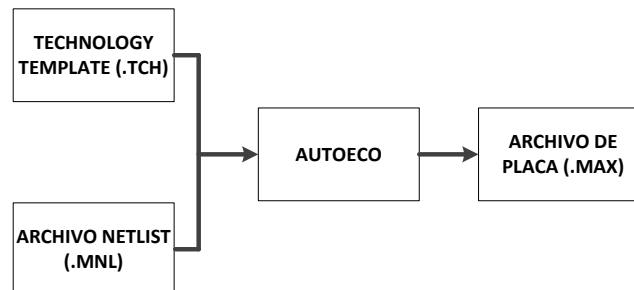


Fig. 4.36. Diagrama del paso de captura a layout

4.2 Especificaciones de los parámetros

Se especifica la configuración de la tarjeta, incluyendo unidades de medición, cuadrículado y espaciado. En suma se puede crear el contorno de la placa (*Board Outline*) y definir las capas, tamaño de pads y vías. El contorno de esta tarjeta es rectangular (27,61 x 45,68 mm).

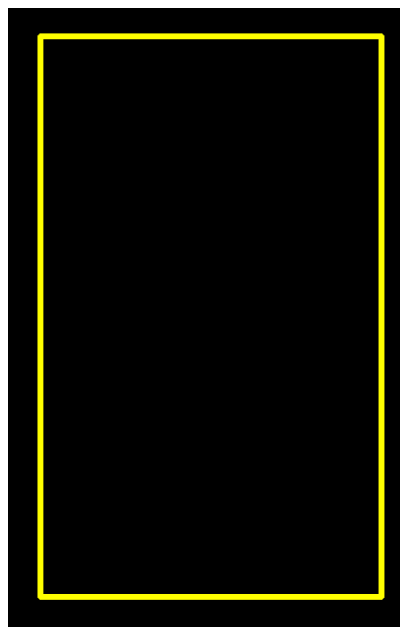


Fig. 4.37. Contorno de la tarjeta

En este caso la tarjeta se trata de un circuito flexible de doble cara, es decir, solo se necesitan rutar la cara Top y la cara Bottom, por ello se activarán dichas capas. Además se activaran las capas correspondientes a la serigrafía, tanto la serigrafía de la capa Top (SST), como la de la

capa Bottom (SSB). Además se activan las capas correspondientes a la máscara de soldadura (SMT y SMB) y a la del posicionado de los componentes (AST y ASB).

Por comodidad y dado que este diseño se está realizando en un entorno europeo, la unidad de medición establecida es el mm.

El microcontrolador impone que la tarjeta sea de clase 4. La clase de una PCB determina las especificaciones técnicas de la misma. En la tabla 4, se puede observar las especificaciones de distintas clases.

CLASE	ANCHO DE PISTA	SEPARACIÓN PISTA-PISTA	SEPARACIÓN PISTA-PAD	SEPARACIÓN PAD-PAD	DIÁMETRO DE TALADO
3	0,30 mm	0,30 mm	0,30 mm	0,30 mm	0,50 mm
4	0,20 mm	0,20 mm	0,20 mm	0,20 mm	0,30 mm
5	0,15 mm	0,15 mm	0,15 mm	0,15 mm	0,30mm
6	0,12 mm	0,12 mm	0,12 mm	0,12 mm	0,20 mm

Tabla 4: Tabla de clases

La separación de los pines del STM32F103C8T6 es de 0.20 mm, es decir, la separación PAD-PAD es de 0.20 mm, perteneciendo esto a una clase 4. La clase viene dada por la especificación más restrictiva. Como regla general, se tiene que al aumentar la clase, se disminuye el tamaño de cobre y separación de éste, lo que conlleva que en la fabricación se precise un aumento en la precisión. Esto supone un aumento en el coste en la fabricación en serie.

4.3 Colocación de los componentes

Cada componente del esquemático tiene que tener un *footprint* asociado a él para poder posicionarlo en la PCB. Se entiende por *footprint* la huella física sobre la placa, necesaria para representar el componente y unirlo a la tarjeta. En este caso se trata de un dibujo de los *pads* donde deberán ir soldados los pins de cada componente, además de una figura que representa el contorno que ocupará cada componente. La herramienta OrCad LayOut consta de un biblioteca con las huellas de diversos componentes, sin embargo, para el diseño de esta FPC solo se han podido utilizar los correspondientes a resistencias y condensadores, para el resto de los componentes ha sido necesario crear el *footprint* de forma manual. La referencia de cada *footprint* es la que se ha utilizado como parámetro en el esquemático, para que al crear la placa esto sean introducidos de forma automática. La siguiente imagen muestra los componentes que se han creado de forma manual.

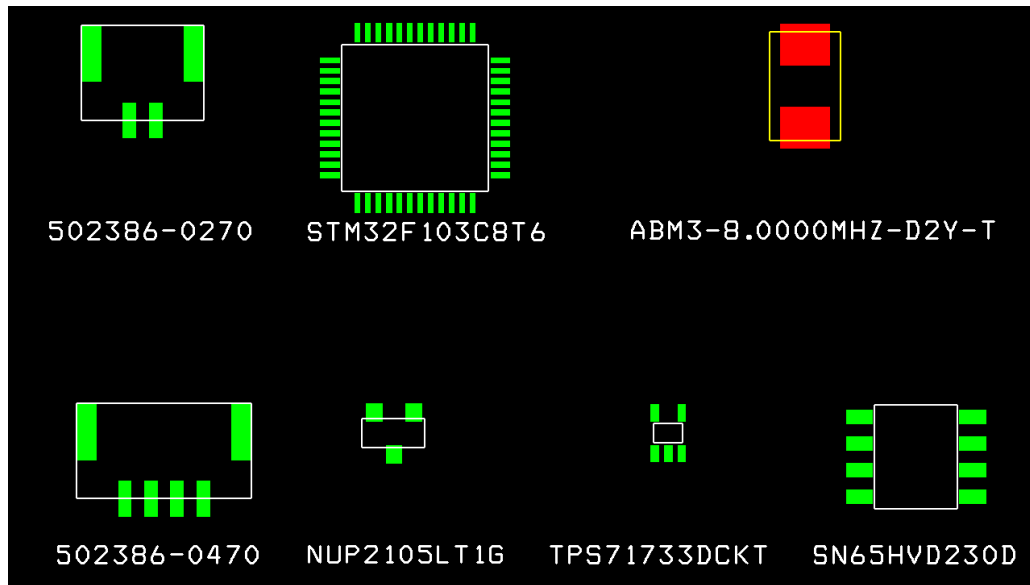


Fig. 4.38. Footprints creados de forma manual

Cada componente irá acompañado de una letra y un número que hace referencia a su designador único, que el mismo que aparece en la captura de esquemático.

Además se introduce un componente nuevo en la capa de serigrafía Bottom, creado por el alumno Javier Rodríguez-Avial, para representar el logo de la Universidad Carlos III de Madrid. Además en la misma capa se pone el nombre de la placa y el autor “*FlexPrototype ISS*”.

Todos los componentes deben ser posicionados dentro de los límites del contorno de la tarjeta, tanto en la capa Top (representados por el color verde), como en la capa Bottom (representados por el color rojo). La distribución de éstos viene condicionada por las conexiones existentes entre ellos así como por estrategias de funcionalidad y diseño, quedando un posicionamiento como el que se muestra a continuación (*Fig. 4.39.*).

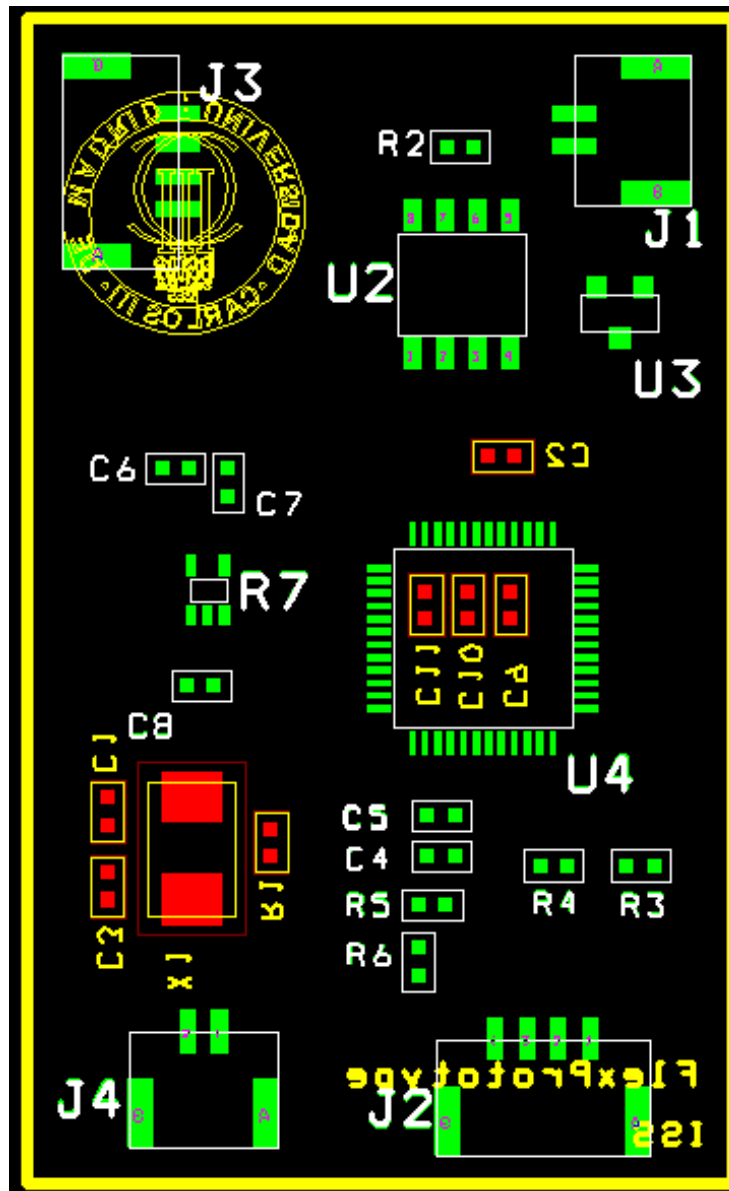


Fig. 4.39. Posición de los componentes en la tarjeta

Otro elemento que hay que posicionar en la PCB son los *fiducials* o marcadores de referencias. Los marcadores de referencia permiten al equipo de montaje automatizado localizar con precisión y colocar cada pieza en el tablero en su posición correspondiente. Estos dispositivos permiten localizar el patrón del circuito, proporcionando así, puntos comunes que pueden ser medidos. Generalmente se hacen dejando un área circular en el borde cerca de la soldadura, en el cual un círculo de cobre es colocado.

La mayoría de los dispositivos que se utilizan para el montaje son transportadores de riel, con la placa sujeta al montaje. Cada placa se sujeta de forma un poco diferente a las demás, cuya varianza es por lo general de pocas décimas de milímetro ya que el montaje se arruinaría sin la debida calibración. De esta manera, un PCB tendrá tres campos de robots los cuales determinaran la orientación adecuada de la placa. Mediante la medición de la ubicación de los

campos dentro de la placa, la máquina va creando una memoria sobre los mismos, permitiendo así calcular que piezas deberán ser movidas para que se tenga un montaje exitoso. Es por ello por lo que se necesita el empleo de marcadores que permitan a la maquinaria de montaje tener un sistema de referencia que evite el montaje inexacto.

Aplicando las directrices del estándar IPC-7351 [12], se debe posicionar como mínimo dos, aunque se recomienda tres, *fiducials* por capa con elementos SMD, es decir, seis marcadores, tres para la capa Top y tres para la capa Bottom. Usando tres marcadores se permite a la máquina determinar los ejes Y y X, así como determinar si la placa ha rotado, lo cual le permitirá rotar partes para ubicarlas correctamente.

La posición de estos marcadores debe ser, en medida de lo posible, en las esquinas de la PCB. Y su tamaño ha de ser circular de diámetro mínimo de un milímetro, máximo tres, con una corona libre de cobre del doble de diámetro como mínimo aunque está recomendado que sea el triple.

Siguiendo estas directrices y debido al reducido tamaño de la PCB se posicionan dos marcadores de un milímetro de diámetro en las esquinas inferiores de la placa, dejando una separación libre de cobre de más de 1 mm (Fig. 4.40.).

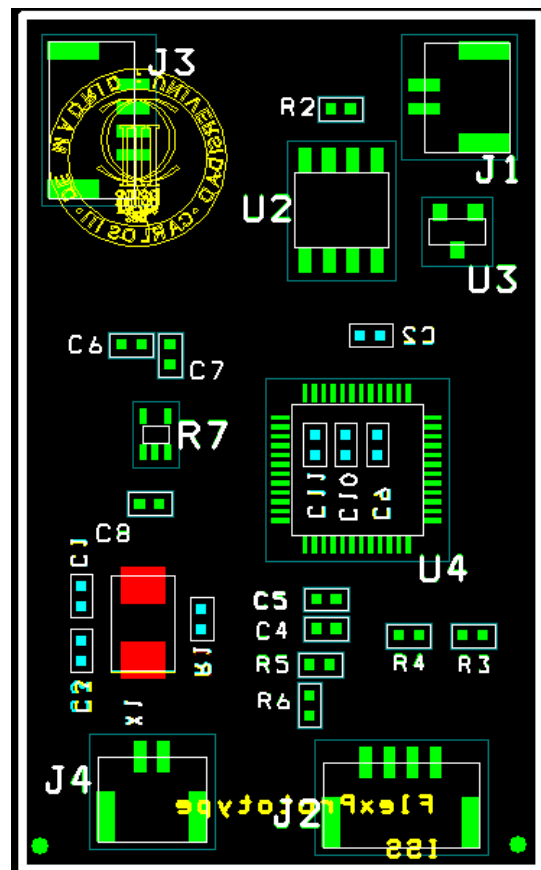


Fig. 4.40. Marcadores de referencia

4.4 Rutado de la placa

Al tratarse de una placa flexible se deben tener en cuenta una serie de aspectos a la hora de hacer el diseño y rutado de ésta. Las recomendaciones concernientes a circuitos impresos flexibles aparecen recogidas en las especificaciones de diseño IPC-2223 [13], que deriva del estándar IPC-2221 [14]. Esta norma establece los requisitos específicos para el diseño de aplicaciones de circuitos impresos flexibles y sus formas de estructuras de montaje y de interconexión de componentes.

Consideraciones generales para rutado PCBs

Para el rutado de esta tarjeta lo primero que se tiene en cuenta son las consideras generales que aplican a los diferentes tipos de PCB [15].

- La distancia de la conexión de las nets debe ser lo más corta posible. A medida que aumenta la longitud de una pista aumenta la resistencia, la capacitancia e inductancia. Lo que pueden ser factores indeseables.
- Las pistas sólo deben tener ángulos de 45 grados. Se debe evitar el uso de ángulos rectos, y en ningún caso utilizar un ángulo mayor de 90 grados
- Se debe llevar la pista hasta el centro del pad, no basta con que solo se toquen. Hay varias razones para esto. La primera es que es descuidado y poco profesional. La segunda es que el programa no puede pensar que la pista está haciendo la conexión eléctrica al pad, pese a que en la fabricación sea cobre de todos modos.
- Se debe evitar el uso de pista entre pads de un componente, solo en caso de mucha densidad y que no hacerlo suponga un perjuicio para el diseño.
- Para altas corrientes, utilizar múltiples vías al pasar entre las capas. Esto reducirá la impedancia de la pista y mejora la fiabilidad. Esta es una regla general siempre que se necesite disminuir la impedancia de la pista o el plano de alimentación.
- Si se considera que las pistas de alimentación y tierra van a ser críticas para el diseño, entonces, deben de ser posicionadas las primeras. También, hacer sus pistas de potencia tan grande como sea posible.
- Mantener las pistas de potencia y de tierra en estrecha proximidad entre sí, si es posible. Esto reduce la inductancia del bucle de su sistema de potencia, y permite la derivación eficaz.
- Se debe mantener una simetría para dar una imagen profesional.
- No es recomendable colocar vías bajo los componentes.
- Asegures de que la huellas coinciden con los componentes reales, para no tener problemas durante la fabricación

Diseñar circuitos para ahorrar material

El ahorro de materia en la fabricación de FPCs ayuda a mantener los costes lo más bajos posibles. Esto es importante dado que los materiales flexibles suelen ser más caros en comparación con el FR4 utilizado en tarjetas rígidas estándar [16].

Se aconseja lograr hacer el diseño en el mínimo espacio posible. La técnica de optimizar el número de circuitos por panel es llamada *nesting* (anidación).

Aunque la anidación se realice rutinariamente por el fabricante, el diseñador puede ayudar en este proceso, teniendo en cuenta de los circuitos flexibles se pueden doblar. Por lo tanto alargando una pista que va a ser doblada, en vez de diseñarla previamente doblada puede ayudar a reducir costes (Fig. 4.41).

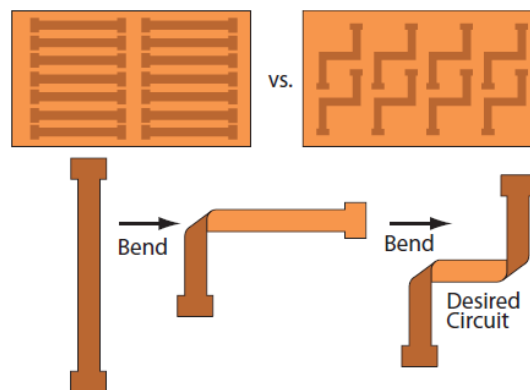


Fig. 4.41. Nesting circuitos flexibles

Reducir el espesor total en la zona de flexión

- Reducir el peso de cobre base (y los correspondientes espesores adhesivos) o reducir el espesor dieléctrico
- Utilizar materiales de base sin adhesivo. Los materiales sin adhesivo generalmente reducirán el espesor de partida de cada sustrato por 1-2 milésimas de pulgada (25-50 micras) cuando se compara con sustratos basados en adhesivos.
- Eliminar las placas de cobre en los conductores en la zona de flexión

Hacer el circuito robusto contra la flexión

- Hacer un balance de los pesos del conductor y espesores del material a cada lado del eje de curvatura.
- En tarjetas multicapa los conductores deben estar escalonados de capa a capa y no apilados uno encima de otro para aumentar la flexibilidad.

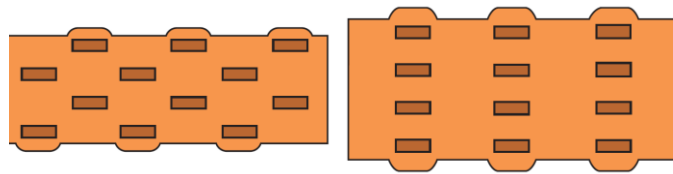


Fig. 4.42. Izquierda correcta, derecha errónea

- Los conductores deberían ser rutados, si es posible, a través de las zonas de flexión lo más perpendicular posible.
- El grosor y la anchura del conductor deben permanecer constantes en áreas de plegado.
- Los taladros metalizados debe mantenerse fuera de las áreas de plegado.
- Evitar las discontinuidades en la capa de recubrimiento en la zona de flexión.
- El contorno del circuito debe ser diseñado para que no haya torceduras en el conjunto acabado.

COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA

Aunque el objetivo principal del diseño de circuitos electrónicos es que cumpla los requerimientos del producto, se debe tener en cuenta que dicho producto pueda funcionar en el mundo real de las interferencias electromagnéticas sin fallos ni daños. Los productos no solamente tienen que sobrevivir a las interferencias sino que está limitada por ley la cantidad de interferencias que estos pueden crear. El estudio y la resolución de estos problemas entran dentro de la disciplina de la compatibilidad electromagnética (EMC). La disciplina de la EMC también incluye el análisis de descargas electrostáticas (ESD)[17].

En este TFG se pretende diseñar una PCB que cumpla con las directrices y estándares regulados por la EMC, ya que es más efectivo en costes usar técnicas EMC durante el inicio del diseño del producto, que intentar medidas de contención en fases más avanzadas.

Uno de los aspecto que se ha tenido en cuenta en el diseño de esta PCB ha sido el empleo de condensadores de desacoplo, descrito en el capítulo anterior, otro es la utilización del NUP2105LT1G para proteger la comunicación CAN de posibles ESD.

También se ha tenido en consideración la separación de planos. Dentro del mundo del circuito impreso, un plano es una hoja sólida de cobre. Es un plano de masa si esa hoja está conectada a masa y se dice que es un plano de alimentación, si está conectado al suministro de alimentación, se suele emplear bastantes condensadores de desacoplo entre ambos planos. En el caso de esta FPC la alimentación se ha dejado como pista y la masa como un plano.

Algunos circuitos pueden tener una gran demanda de corriente en periodos muy cortos de tiempo. Cualquier inductancia en su camino constituye una fuente de ruido que será radiada a través de esa inductancia. Los planos suelen tener muy baja inductancia para estas corrientes, por lo tanto, los planos deben ser usados como medio de reducir el ruido.

Incluso en el caso de que no se utilicen corrientes importantes, pequeñas señales en circuitos rápidos pueden generar ruido al pasar por inductancias parasitas. El uso de planos reduce el ruido cuando se tienen circuitos con señales rápidas.

El ruido en el plano de masa es un problema más grave que en el plano de alimentación. Éste es producido por los transitorios de alimentación y por las corrientes de retorno SSO (*Simultaneous Switching Outputs* o salidas de conmutación al mismo tiempo). Los transitorios en la alimentación pueden ser controlados con el uso de condensadores de desacoplo, pero los ruidos en la masa, no pueden ser desacoplados.

El uso del mismo plano de masa para retornar todas las corrientes de un circuito hace que deban ser observadas precauciones especiales. Una de estas precauciones es conocer por donde retornan exactamente las corrientes del circuito. En función de la frecuencia, las corrientes no siempre retornan por el mismo lugar. Si las frecuencias son bajas lo hacen por el camino de menor resistencias, sin embargo, para altas frecuencias retornan por el camino de menor inductancia.

Otro aspecto a tener en cuenta es la segregación de circuitos, que es la técnica mediante la cual hacemos una catalogación de los circuitos presentes en un sistema para, posteriormente, distribuirlos correctamente sobre el circuito impreso. Conviene separar los circuitos para que no existan interferencias entre ellos. Primero, debemos hacer dos divisiones importantes: la primera división corresponde a los circuitos generadores de ruido, después, los circuitos sensibles al ruido. Dentro del primer circuito encontraremos los microprocesadores, osciladores y la lógica rápida. Como sensibles al ruido encontramos los amplificadores operacionales, circuitos analógicos y amplificadores de baja frecuencia.

Se debe emplazar cada circuito en un lugar bien definido y delimitado del resto. Cada circuito puede tener su propio plano de masa y alimentación, o quizás puede compartir éstos con otros circuitos, pero se tendrá especial cuidado a que fuera de esta limitación de planos no existan componentes.

La última consideración que se tiene esta FPC para la ECM es la correspondiente al cristal de cuarzo y señales rápidas.

A pesar de que el plano de masa debe ser lo más continuo posible, se debe tener extremo cuidado cuando se decide la disposición del cristal de cuarzo del microcontrolador. El cristal se debe posicionar lo más cerca posible del microcontrolador y la conexión entre ambos debe ser lo más corta posible. Una buena práctica es vaciar el plano de masa de éste o realizar un corte en el plano de masa alrededor del cristal y sus condensadores asociados. Este corte deja un estrecho camino con cobre, de unos pocos milímetros, por encima del cual pasan las pistas de conexión del cristal. En este caso el cristal se posiciona en la cara Bottom, en la cual en vez de vaciar el plano de masa, directamente no se crea.

La conexión entre el *transceiver* del CAN y el microcontrolador se realiza de la siguiente forma: en el plano de masa se crea un estrecho puente de cobre entre las áreas del CAN y la zona digital. Por la capa superior y exactamente donde se encuentra este puente, se pasan las pistas TX y RX (transmisión y recepción) (*Fig. 4.43. Consideraciones EMC*

). Este puente debe ser bastante estrecho para que tenga mayor inductancia que el retorno de masa general, pero que pueda albergar las dos pistas. El resto de pistas de conexión del *transceiver* de CAN y que no contengan señales de alta frecuencia, como *enables*, no es necesario que tengan puente en el plano de masa. Esta técnica es conocida como *mirco-islas*.

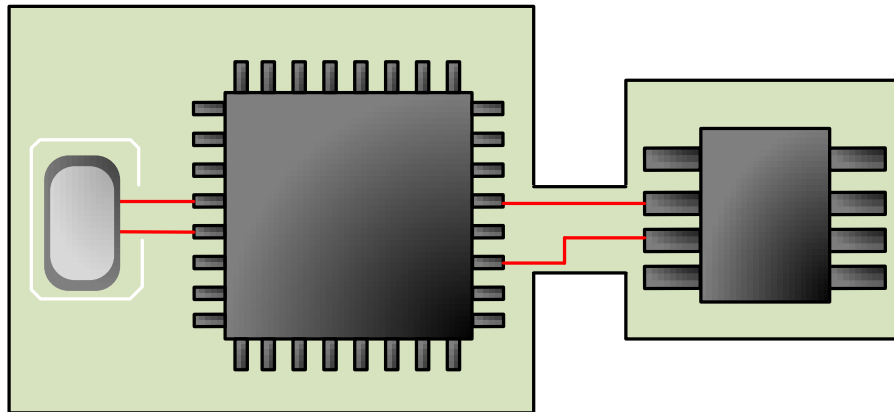


Fig. 4.43. Consideraciones EMC

Rutado final

Aplicando todas las consideraciones descritas en este apartado, se procede a rutar la tarjeta. Esta tarjeta irá rutada a doble capa, dejando la capa Bottom para posicionar los condensadores de desacoplo del microcontrolador, debajo de éste, y el bloque oscilador. El tamaño de las pistas de alimentación se aumenta con respecto al resto de pistas.

Una vez rutada se procede a incluir el plano de masa teniendo en cuenta la segregación de circuitos (analógico/digital) y el resto de condiciones descritas anteriormente. El resultado final el este mostrado a continuación (Fig. 4.44).

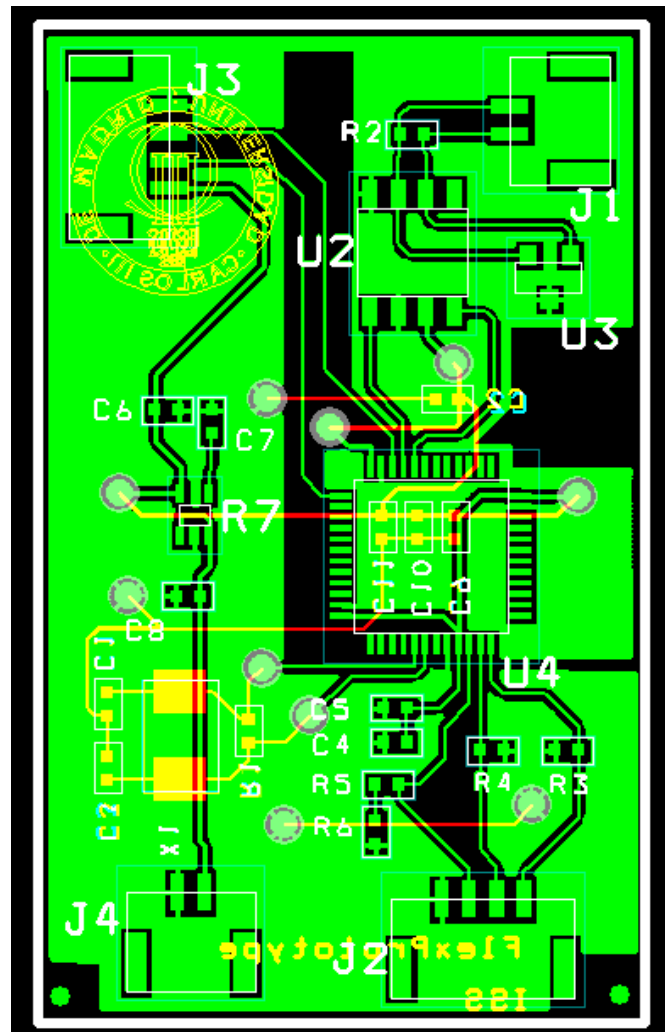


Fig. 4.44. Rutado Final

4.5 Finalización de la placa

Una vez finalizado el rutado de la tarjeta para poder dar por terminado el diseño, lo primero que se debe hacer es comprobar que no se queda ninguna pista libre de conexión, i. e., que la tarjeta está rutada entera. Para ello, el programa OrCad layout dispone una herramienta denominada *Statistics* que muestra las estadísticas de la tarjetas, entre ellas, el tanto por ciento de rutado de la placa, que debe ser del 100% (Fig. 4.45). También muestra si existe algún componente fuera de los límites de la tarjeta, entre otros datos.

Statistic	Enabled	Total
Board Area	12.6	12.6
Equivalent IC's	8.0	8.1
Sq. inches per IC	1.58	1.55
# of pins	120	122
Layers	3	28
Design Rule Errors	0	0
Time Used	12:27	12:27
% Placed	100.00%	100.00%
Placed	27	29
Off board	0	0
Unplaced	0	0
Clustered	0	0
Routed	70	70
% Routed	100.00%	100.00%
Unrouted	0	0
% Unrouted	0.00%	0.00%
Partials	0	0
% Partials	0.00%	0.00%
Vias	10	10
Test Points	0	0
Vias per Conn	0 14	0 14

Fig. 4.45. Herramienta Statistic

Por último se debe cotejar que se cumplen con todas las reglas de diseños utilizando la herramienta DRC (*Desing Rule Check*) que determina el número de errores y los señala en su caso. Estos errores deberán ser corregido hasta que no aparezca ninguno (Fig. 4.46).

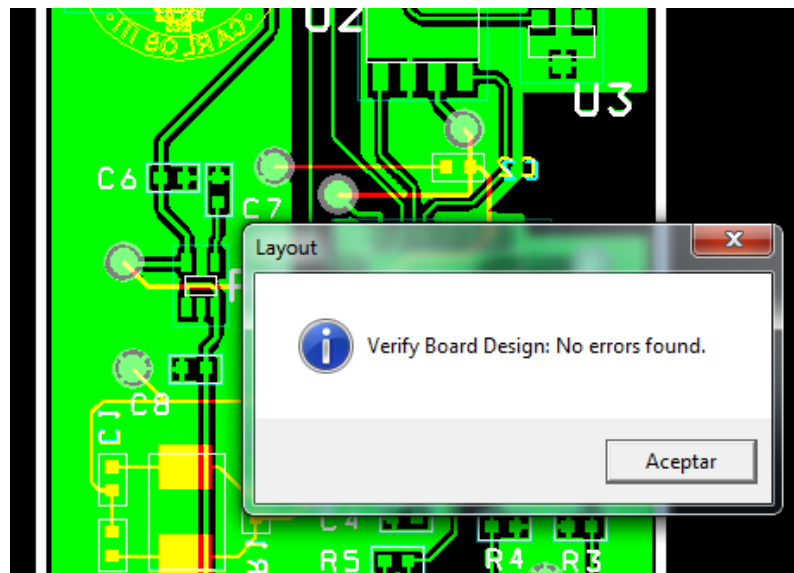


Fig. 4.46. DCR

4.6 Documentación

El último paso para el diseño físico de la placa es crear la documentación de fabricación, que es la documentación que requieren los fabricantes para poder crear y montar la tarjeta.

El tipo de archivo estándar de fabricación, es el Gerber. Este puede exportarse en diferentes formatos. En la actualidad todos los *softwares* de diseño tienen como opción exportar en formato Gerber 274x. Por lo general los fabricantes pueden importar los diseños en los formatos más comunes, pero suelen recomendar el Gerber 274X por tener las aperturas incluidas en cada archivo, reduciendo así la oportunidad de error humano y los tiempos en la carga de datos.

Es necesario un archivo por cada capa. Y es de buena práctica tener en cuenta una capa extra con el contorno exacto del circuito y mecanizados internos si los tuviera. También es aconsejable presentar las capas de la máscara de soldadura (*solder mask*) para los componentes SMD. Se ha de incluir también el archivo de taladros, el formato estándar es el Excellon, aunque en el caso de existir taladros no metalizados, es aconsejable incluirlos en un segundo archivo de taladros.

Para realizar este paso con OrCad LayOut, se debe seleccionar primero las capas que se desean incluir en el archivo Gerber (Fig. 4.47), y la propiedad de éstas.

Plot output File Name	Batch Enabled	Device	Shift	Plot Title
*.TOP	Yes	EXTENDED GERBER	No shift	Top Layer
*.BOT	Yes	EXTENDED GERBER	No shift	Bottom Layer
*.GND	No	EXTENDED GERBER	No shift	Ground Layer
*.PWR	No	EXTENDED GERBER	No shift	Power Layer
*.IN1	No	EXTENDED GERBER	No shift	Inner Layer 1
*.IN2	No	EXTENDED GERBER	No shift	Inner Layer 2
*.IN3	No	EXTENDED GERBER	No shift	Inner Layer 3
*.IN4	No	EXTENDED GERBER	No shift	Inner Layer 4
*.IN5	No	EXTENDED GERBER	No shift	Inner Layer 5
*.IN6	No	EXTENDED GERBER	No shift	Inner Layer 6
*.IN7	No	EXTENDED GERBER	No shift	Inner Layer 7
*.IN8	No	EXTENDED GERBER	No shift	Inner Layer 8
*.IN9	No	EXTENDED GERBER	No shift	Inner Layer 9
*.I10	No	EXTENDED GERBER	No shift	Inner Layer 10
*.I11	No	EXTENDED GERBER	No shift	Inner Layer 11
*.I12	No	EXTENDED GERBER	No shift	Inner Layer 12
*.SMT	Yes	EXTENDED GERBER	No shift	Soldermask Top
*.SMB	Yes	EXTENDED GERBER	No shift	Soldermask Bottom
*.SPT	No	EXTENDED GERBER	No shift	Solder Paste Top
*.SPB	No	EXTENDED GERBER	No shift	Solder Paste Bottom
*.SST	Yes	EXTENDED GERBER	No shift	Silkscreen Top
*.SSB	Yes	EXTENDED GERBER	No shift	Silkscreen Bottom
*.AST	Yes	EXTENDED GERBER	No shift	Assembly Top
*.ASB	Yes	EXTENDED GERBER	No shift	Assembly Bottom
*.DRD	Yes	EXTENDED GERBER	No shift	Drill Drawing
*.BO	Yes	EXTENDED GERBER	No shift	Board Outline

Fig. 4.47. Capas habilitadas

OrCad LayOut permite crear los archivos Gerber de forma automática junto con el archivo de taladros [Anexo9].

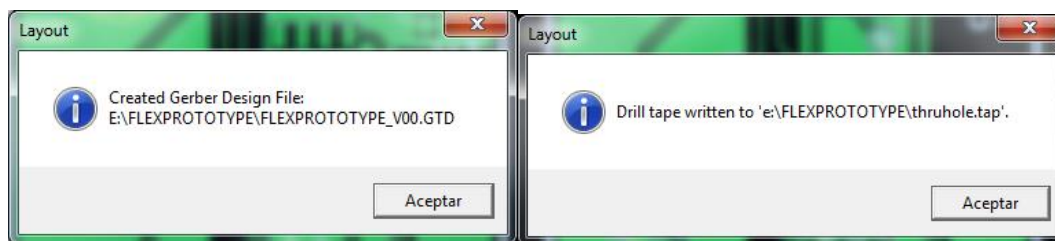


Fig. 4.148. Creación de archivos Gerber y archivo de taladro

Aunque el archivo Gerber274x es de uso estándar, cada vez se está utilizando más el archivo ODB++, que crea una distribución de carpetas estándar como la que se muestra a continuación.

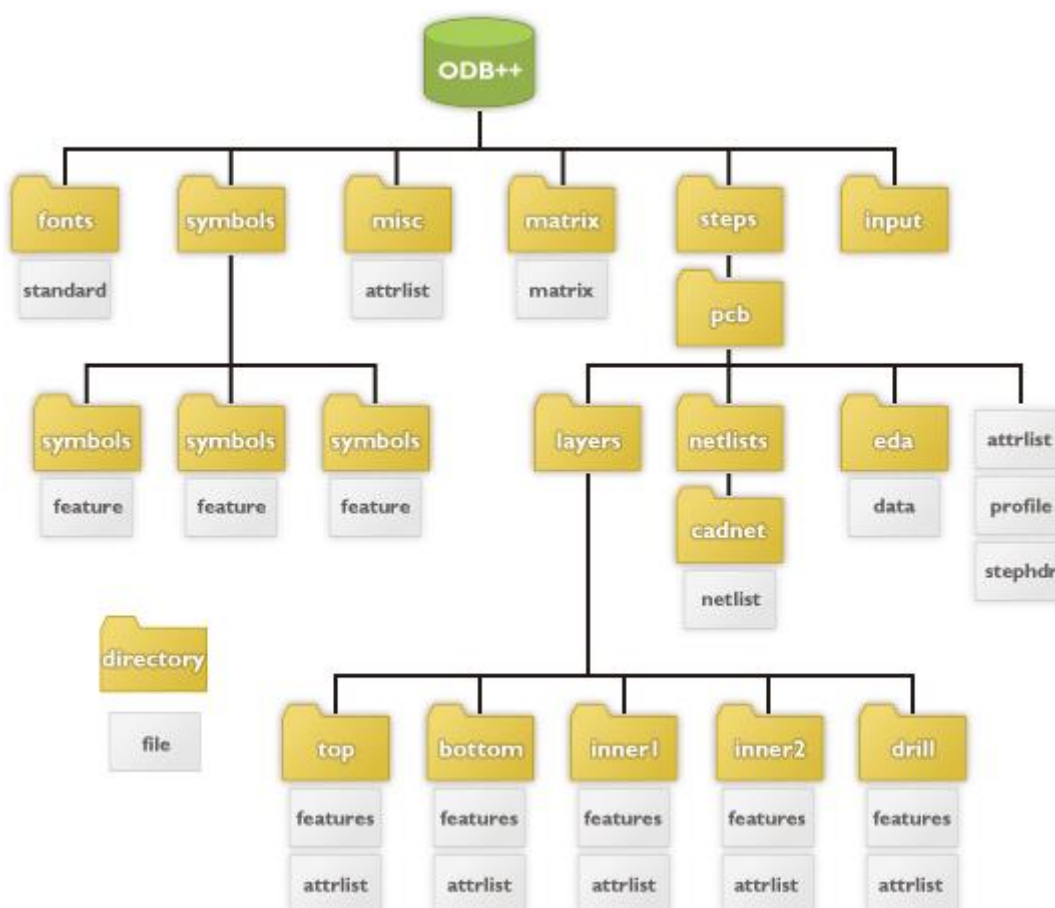


Fig. 4.49. Estandar ODB++

4.6.1 ESPECIFICACIONES DE FABRICACIÓN

Además de los archivos de fabricación creados por la herramienta software OrCAD, y la lista de materiales creada en el capítulo anterior, es necesario enviar al fabricante un documento de especificaciones de fabricación. En este documento debe aparecer reflejado el tipo de material que se desea utilizar, el espesor del cobre, tipo de acabado, etc. Esta tarjeta responde a un tipo estándar de circuito impreso flexible a dos caras, con las siguientes cualidades:

- Tipo de tarjeta según IPC 603 : tipo 2
- Numero de capas: 2
- Espesor final: 0.15mm
- Espesor del cobre: 35 μ m
- Acabado de superficie: Hall (sin plomo), inmersión en estaño o inmersión en oro.
- Capas de serigrafía: capa Top y capa Bottom.
- Mascara de soldadura: SI

CAPÍTULO 5: PROGRAMACIÓN STM32F103C8T6

En este capítulo se describe el proceso de programación del microcontrolador STM32F103C8T6 de tal modo que pueda interpretar las entradas analógicas procedentes de los sensores y producir una salida CAN con dicha información. Para ello se describe inicialmente la metodología clásica de trabajo para el desarrollo *software* de un microcontrolador (MCU), para posteriormente explicar cómo aplicando un Sistema de Prototipado Rápido para Control (RCP) se puede ahorrar tiempo y conocimiento profundo de la arquitectura.

Tradicionalmente todo sistema informático, incluyendo los controladores digitales, se han programado utilizando lenguajes textuales que proporcionan mayor o menor facilidad de programación. Pero todo lenguaje textual requiere un enfoque dirigido a la arquitectura *hardware* para la que se destine el programa, este enfoque incluye la configuración e inicialización de los periféricos de entrada/salida que intervengan. Procedimientos básicos que exigen una gran cantidad de tiempo y conocimientos específicos de la arquitectura empleada.

Para combatir estos defectos del desarrollo tradicional, que continua vigente hoy día en multitud de centros de investigación y empresas del sector tecnológico, se planteó una metodología de programación basada en lenguajes gráficos, también llamado diseño basado en modelos (*Model Based Design* o MBD), para proveer de cobertura completa para adquisición de datos, procesamiento y manejo de todos los periféricos de I/O (*Input/Output*) en todas sus modalidades a los controladores digitales, esta metodología recibe el nombre de Prototipado Rápido para control, en inglés *Rapid Control Prototyping* (RCP). Metodología de trabajo que permite realizar cuantas pruebas, verificaciones e iteraciones del programa sean necesarias en espacios de tiempo muy cortos, aún al comienzo de la programación.

Para lograr estos bondadosos efectos sobre la metodología de trabajo, los sistemas RCP proveen de un alto nivel de abstracción (véase *Fig. 5.50*) durante la programación, debido a este alto nivel de abstracción la complejidad natural de los periféricos de entrada/salida (I/O, de input/output en inglés) es obviada completamente, haciendo posible el uso del sistema RCP por una audiencia multidisciplinar, circunstancia que ha sido verificada mediante procedimientos normalizados para el RCP utilizado en este Trabajo Fin de Grado, el RCP avanzado propuesto en la Tesis Doctoral de Antonio Flores Caballero.

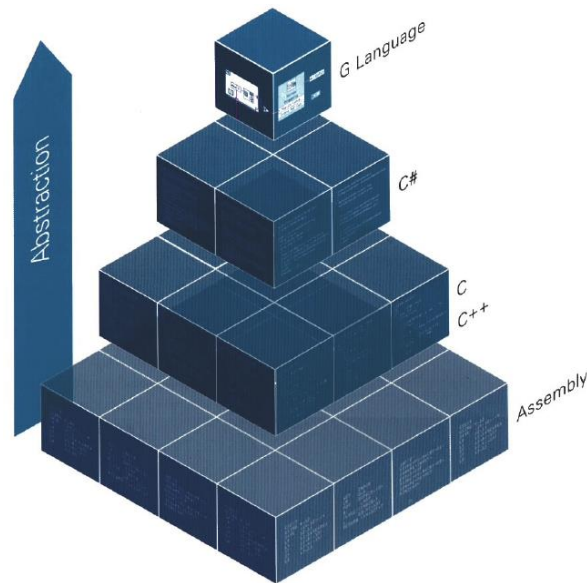


Fig. 5.50. Representación esquemática de la carga de trabajo según el lenguaje de programación empleado, para el mismo resultado

Cada celda de la fig. 5.1 puede considerarse como una semana de trabajo, en cada lenguaje se logran los mismos objetivos.

Utilizando un lenguaje gráfico, el ahorro en tiempo y la abstracción del programador respecto de la arquitectura se encuentran maximizados.

El lenguaje gráfico utilizado es el provisto por Matlab / Simulink. Programar bajo Simulink consiste en utilizar bloques gráficos configurables que proporcionan distintas funcionalidades, ya sea capacidades de I/O de la tarjeta controladora, funciones matemáticas, filtros digitales... etc. Cada bloque del lenguaje gráfico puede considerarse como un módulo de código perfectamente depurado cuyas entradas y salidas se interconectan con otros módulos de software, llegando a crear un programa completo.

La siguiente figura (Fig. 5.51) muestra el programa realizado para el MCU con la herramienta Simulink.

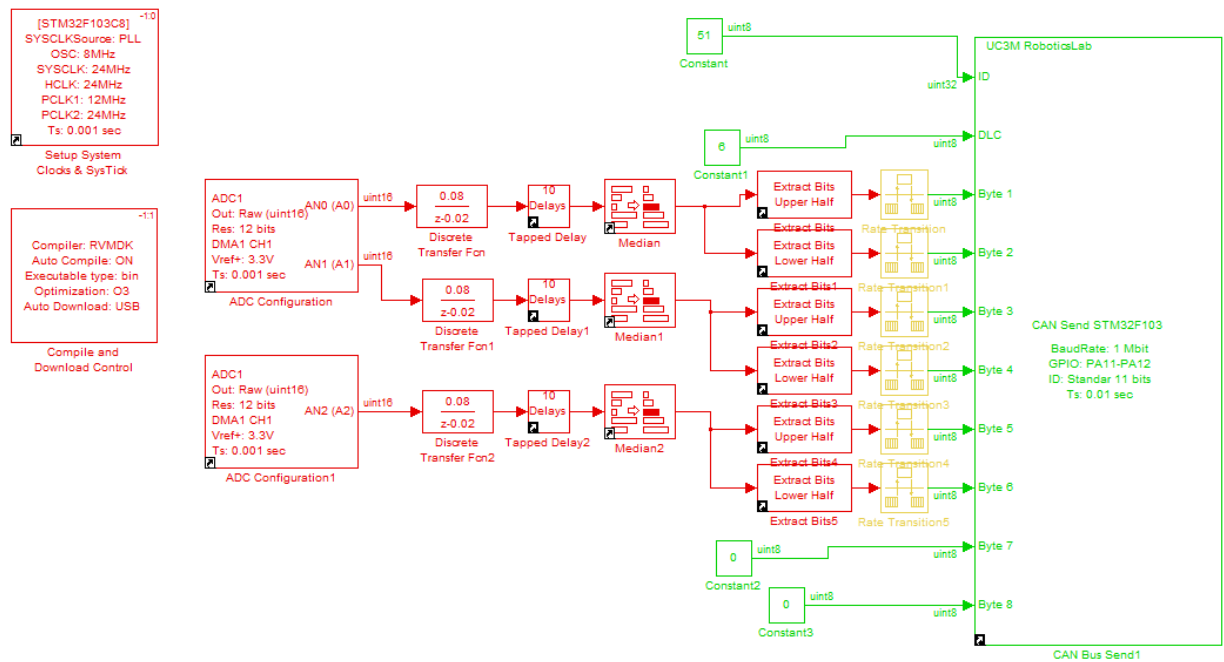


Fig. 5.51. Programa para MCU STM31F103C8T6

CAPÍTULO 6: VALIDACIÓN DEL SISTEMA

Una vez terminado el diseño de la tarjeta, para comprobar su funcionamiento real es necesario que se proceda a su fabricación. Este capítulo está dividido en dos bloques principales, una concerniente a la fabricación de la tarjeta, y otra correspondiente a la validación del sistema una vez esté fabricado.

6.1 Fabricación

Al tratarse de una tarjeta flexible su fabricación no se puede realizar dentro de la UC3M, por lo que es necesario externalizar el proceso de fabricación. Para ello se hace un estudio de distintas empresas que trabajan con tecnología flexible, tanto a nivel nacional como internacional.

6.1.1 ESTUDIO DE MERCADO

Una vez buscadas las empresas que trabajan en la fabricación y montaje de circuitos impresos flexibles, se pide presupuesto a las empresas más representativas. Para ello se les facilita los archivos Gerber y la lista de materiales obtenidos en capítulos anteriores. Las especificaciones para la solicitud de presupuesto son las mismas para todas las empresas y se trata de un prototipo (cantidad: uno) de una FPC con las especificaciones descritas en el apartado 4.6.1. Además se les solicita un presupuesto con las mismas especificaciones pero para sustrato rígido (material FR4) con la intención de poder hacer una comparativa de precios dependiendo del tipo de sustrato.

Con la información facilitada por alguna de las empresas de las que se obtuvo repuesta se crea una tabla que refleja los distintos precios y tiempos de entrega para el mismo producto, ya sea sobre sustrato flexible (Tabla5) o sobre sustrato rígido (Tabla6). Para ambas tablas se utiliza el dólar estadounidense (\$) como moneda de referencia.

		PCB FLEXIBLE						
EMPRESA	PAÍS	CANTIDAD MÍNIMA	TIEMPO DE ENTREGA	PREPARACIÓN	FABRICACIÓN	MONTAJE	ACOPIO	PRECIO TOTAL
INYDEL	España	10 unidades	15 días	609,19 \$	954,14 \$	115,07 \$	49,79 \$	1 728,20 \$
San Francisco Circuit	USA	10 unidades	5 días	-	1812,50 \$	-	-	1812,50 \$
FPC Express	China	10 unidades	14 días	270,00 \$	85,00 \$	350,00 \$		905,00 \$
Pcbonline	España	100 unidades	La empresa no presupuesta menos de 100 unidades					-
ljpcb	China	1 unidad	18 días	80,00 \$	60 \$	170,00 \$		310,27 \$
3g technology	China	30 unidades	15 días	-	-	-	-	1200,00 \$
kejiepcb	China	12 unidades	5 días	-	428,00 \$	58,00 \$		486,00 \$
ourpcb	China	1 unidad	30 días	120,00 \$	80,00 \$	150,00 \$	60,00 \$	422,00 \$
alphacircuits	USA	1 unidad	25 días	-	-	-	-	1475,00 \$
sienta	China	1 unidad	20 días	-	-	-	-	417,00 \$
raypcb	China	1 unidad	5 días	-	-	-	-	280,00 \$
sierra circuits	USA	20 unidades	10 días	-	-	-	-	1870,40 \$

Tabla 5: Presupuestos desglosados por empresas

		PCB RÍGIDA						
EMPRESA	PAÍS	CANTIDAD MÍNIMA	TIEMPO DE ENTREGA	PREPARACIÓN	FABRICACIÓN	MONTAJE	ACOPIO	PRECIO TOTAL
INYDEL	España	10 unidades	15 días	270.75 \$	158,39 \$	115,07 \$	49,79 \$	594,01 \$
San Francisco Circuit	USA	50 unidades	5 días	-	540,00 \$	-	-	540,00 \$
FPC Express	China	10 unidades	14 días	85,71 \$	85,00 \$	139,00 \$	-	309,71\$
Pcbonline	España	1 unidad	15 días	113.71 \$		40.61 \$	32.22 \$	186,55 \$
ljpcb	China	1 unidad	18 días	80 \$	60 \$	170 \$		310,27 \$
3g technology	China	10 unidades	15 días	-	-	-	-	227,00 \$
kejiepcb	China	14 unidades	5 días	-	358 \$	58\$		416,00 \$
ourpcb	China	1 unidad	30 días	120 \$	80 \$	150 \$	60 \$	422,00 \$
alphacircuits	USA	1 unidad	25 días	-	-	-	-	1300,00 \$
sienta	China	1 unidad	20 días	-	-	-	-	367,00 \$
raypcb	China	1 unidad	5 días	-	-	-	-	200,00 \$
sierra circuits	USA	20 unidades	10 días	-	-	-	-	678,85 \$

Tabla 6: Presupuestos desglosados por empresas

6.1.2 PROTOTIPO RÍGIDO

Debido al alto coste que supone implementar el diseño sobre sustrato flexible se decide hacer primero un prototipo sobre sustrato rígido para validar su funcionamiento. Este prototipo se realiza de forma gratuita en los laboratorios de la empresa española Sitem SA. Estos laboratorios cuentan con un maquina LPKF de fabricación de prototipos. Dicha máquina interpreta los archivos Gerber y utiliza esta información para fresar, cortar y taladrar el cobre laminado en ambas caras de un sustrato de plástico (Fig. 6.52).

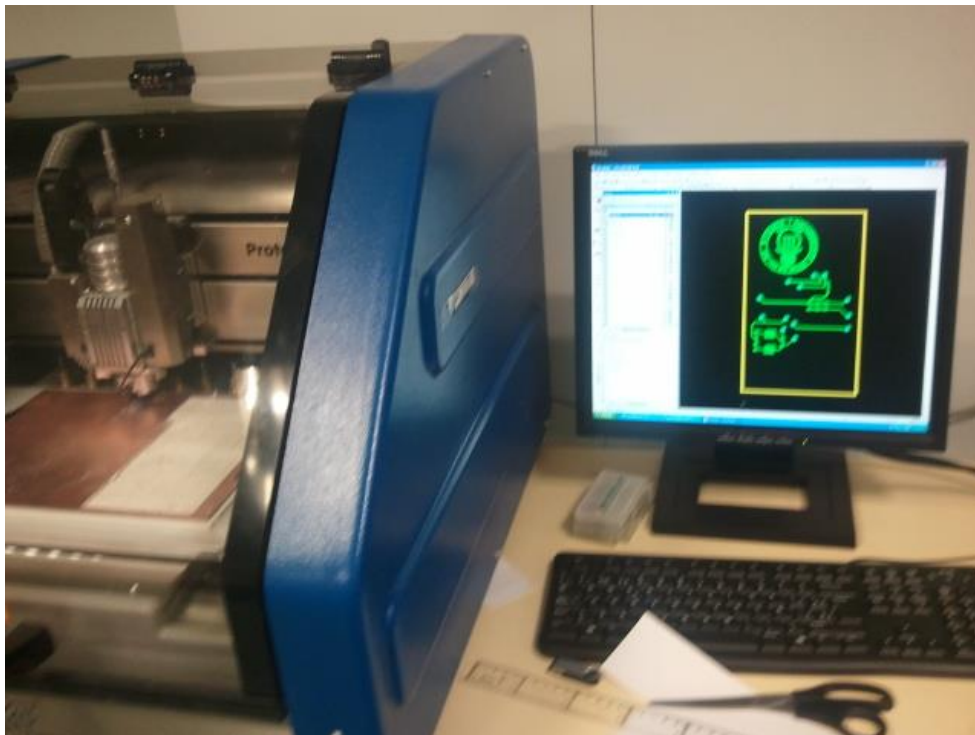


Fig. 6.52. Fabricación de prototipo con máquina LPKF

Con esta maquinaria permite crear la PCB diseñada pero no permite hacer el montaje de los componentes. El montaje de los componentes se hace de forma manual, es decir, se utiliza una estación de soldadura y una bobina de estaño para hacer la unión de los componentes a la PCB (Fig. 6.53). Para facilitar la soldadura se cambian las resistencias y los condensadores por unos de la misma familia pero con milimétrica 0603. Este cambio se realiza también en las huellas del *layout* del circuito, pero solo para la creación del prototipo manual, en el resto del proceso de este TFG prevalece el sistema original.

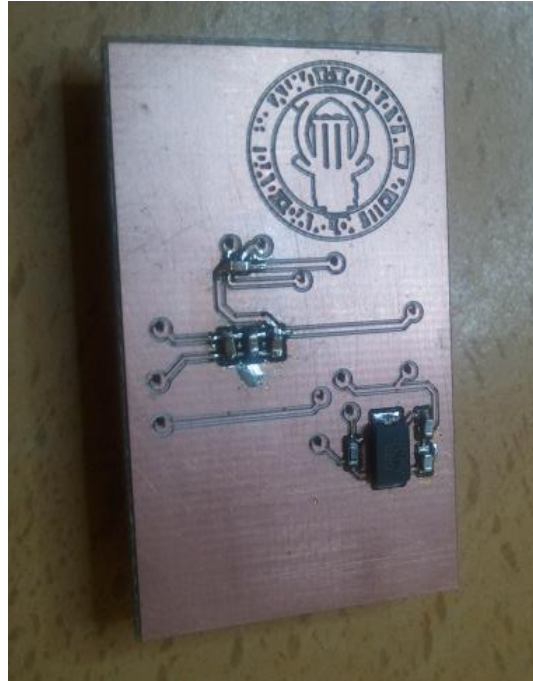


Fig. 6.53. Cara Bottom Prototipo soldado manualmente

6.1.3 PROTOTIPO FLEXIBLE

Una vez que se comprueba que el prototipo rígido cumple con los requisitos funcionales, como se explicara en el siguiente apartado de este capítulo. Se procede a su fabricación en sustrato flexible.

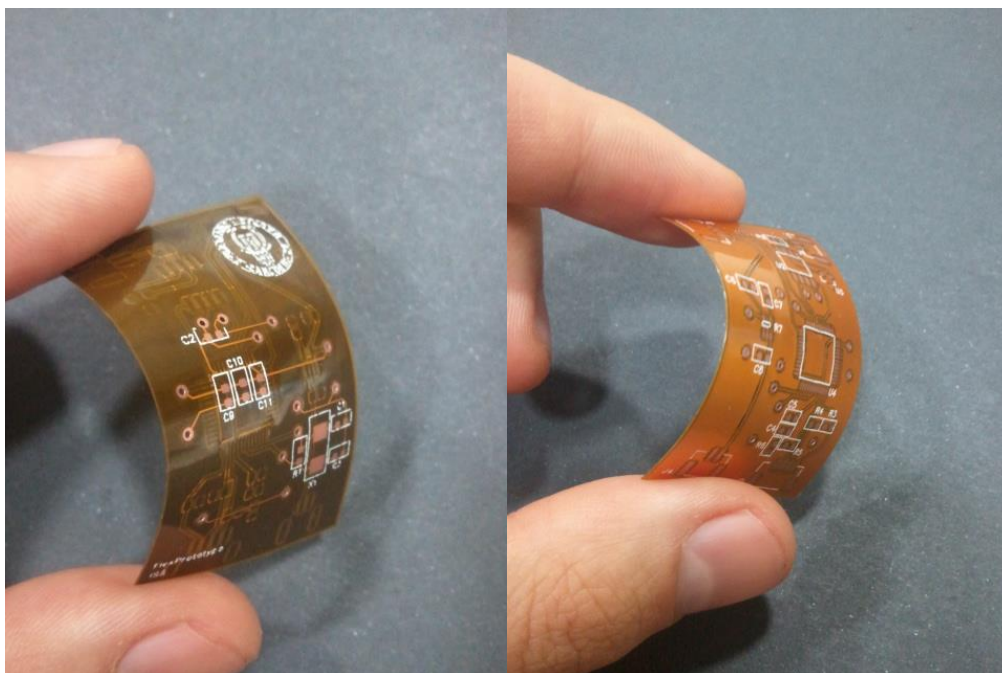


Fig. 6.54. FlexPrototype ambas caras

Para abaratar costes se realiza el montaje de forma manual, análogamente al sustrato rígido

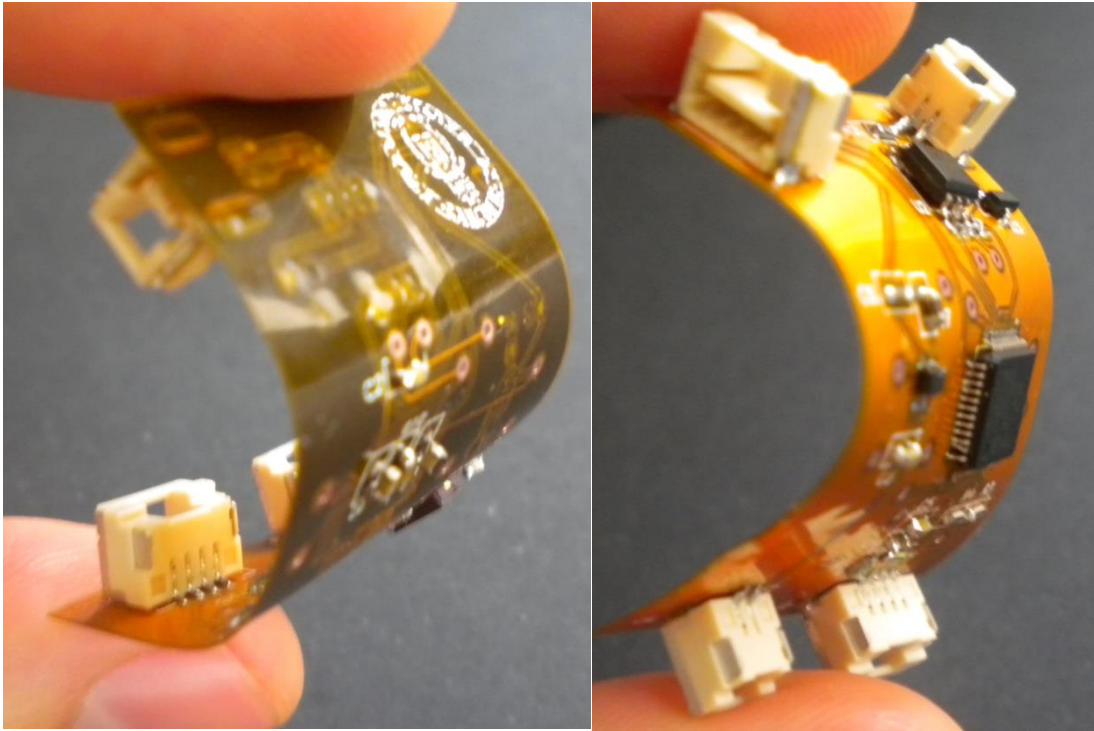


Fig. 6.55. Montaje prototipo flexible

6.2 Validación

Una vez que la tarjeta está fabricada, se tiene que hacer una validación del sistema, primero se debe cotejar que la tarjeta ha sido fabricada y montada de forma exitoso, y cuando esto se confirme se procede a hacer una validación funcional para comprobar que el diseño cumple con el objetivo de su creación.

6.2.1 VALIDACIÓN DE FABRICACIÓN

Antes de hacer las pruebas funcionales es primordial comprobar que la tarjeta está bien fabricada y ensamblada. Para ello se procede a una inspección visual comprobando que los siguientes aspectos:

- Las dimensiones de la tarjeta son las correspondientes al diseño.
- Los componentes montados son los que aparecen reflejados en la lista de materiales, y se presentan en buen estado.
- La soldadura es resistente y no existen pines mal soldados.
- Las capas no tienen presencia de burbujas, grietas, rasguños, agujeros, poros... etc.
- No se aprecian cortocircuitos entre pistas o pines.
- Las capas están bien adheridas unas con otras.

Además con la ayuda de un multímetro se realiza un test de continuidad, para comprobar que existe continuidad entre los nets homónimos y que no se producen cortos entre las pistas, pines o con el plano de masa.

6.2.2 VALIDACIÓN FUNCIONAL

Una vez que está comprobada la correcta fabricación de la tarjeta, se debe comprobar su correcto funcionamiento.

Lo primero que se coteja es que el regulador revive y proporciona la alimentación deseada al resto de los componentes.

Una vez que esto está verificado se debe cargar el programa creado para el microcontrolador, para ello se utiliza el conector de programación.

Por último se debe constatar que la tarjeta cumple con su propósito funcional, es decir, que es capaz de interpretar los datos analógicos otorgados por los sensores de la plataforma de

microclima CIDETEC y enviar esa información por medio del protocolo de comunicación CAN, descrito al inicio de este TFG. Para ello se realiza el montaje del sistema completo, y se analiza la salida obtenida en el depurador, ante variaciones de las magnitudes mediadas por los sensores.

Los resultados experimentales reflejados por las captura de pantalla del depurador mostradas a continuación (*Fig. 6.56*) muestran la tensión de salida de los sensores ya registrada por el microcontrolador a variaciones de humedad, presión y temperatura.

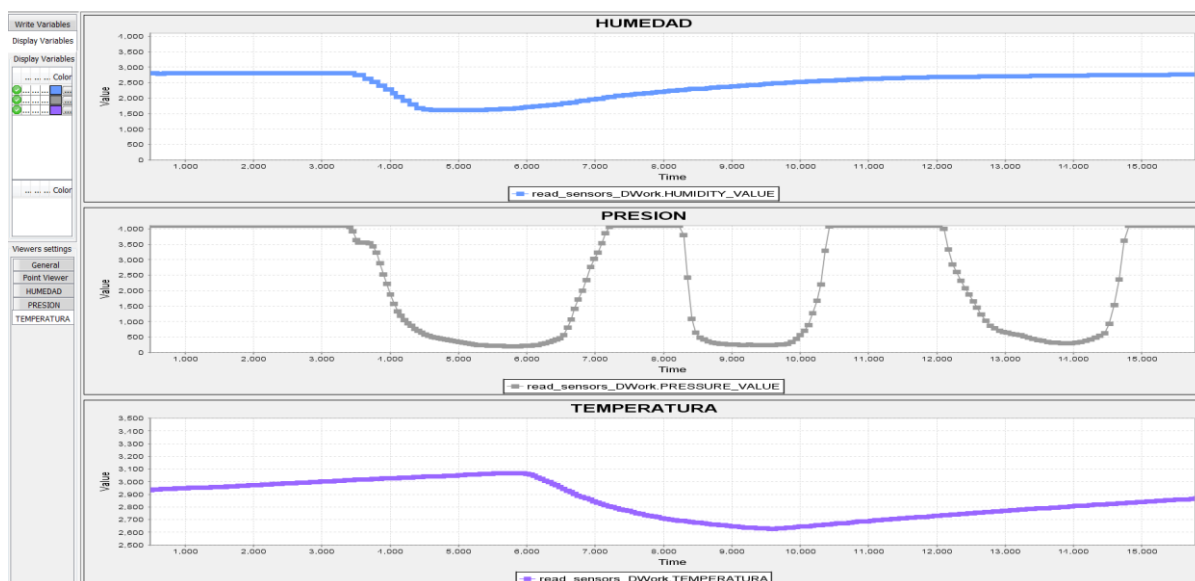


Fig. 6.56. Lectura sensores humedad, presión y temperatura

Por lo que se puede concluir que el diseño cumple con los requisitos funcionales establecidos.

CAPÍTULO 7: PRESUPUESTO

En este último capítulo, se van a analizar los costes que han sido necesarios para el desarrollo de este trabajo fin de grado. Éstos van a clasificarse en dos grandes grupos, según sean costes materiales o costes de desarrollo.

El coste material viene reflejado en la tabla 7. No han sido incluidos los aparatos presentes en el laboratorio, al ser parte del instrumental disponible, ni tampoco el coste derivado de las licencias software, puesto que ya se disponía de ellas. Y se toma como presupuesto de fabricación el más económico obtenido en el mercado.

Elemento	Coste unitario (Euros)	Unidades empleadas	Coste total (Euros)
Lista de materiales	13,30	1	13,30
Fabricación	228,91	1	228,91
TOTAL			242,21

Tabla 7: Coste de los materiales

La tabla 8 recoge los costes del desarrollo, derivados del trabajo de ingeniería y de la redacción de este documento. Para su estimación, se ha tomado el salario medio de un ingeniero técnico industrial [18], con las mismas competencias que un graduado en ingeniería industrial en cualquiera de sus especialidades.

Actividad	Euro/hora	Número de horas	Coste total (Euros)
Diseño y validación del sistema	30	200	6000
Documentación	15	80	1200
TOTAL			7200

Tabla 8: Coste de desarrollo

Finalmente, el presupuesto total del proyecto, suma de los costes del material y del personal, quedan reflejados en la tabla 9.

Tipo de coste	Coste (Euros)
Coste del material	242,21
Coste del desarrollo	7200
Total antes de IVA	7442,21
IVA (21%) + Costes Generales (10%)	1562 + 744
TOTAL	9748,21

Tabla 9: Coste de desarrollo

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

8.1 Conclusiones Finales

Una vez descrito en detalle todo el proceso del diseño y la implementación de sistema, así como su validación, este último apartado recoge una serie de conclusiones finales de este trabajo fin de grado.

- Se ha recopilado y expuesto información útil acerca del estado del arte de los circuitos flexibles, utilizando diversas fuentes. Además se han planteado distintas soluciones que ofrece el mercado para fabricar estos circuitos. De esta forma, se ha situado al proyecto en su contexto socio-económico actual.
- Se ha aplicado satisfactoriamente una metodología propia para el diseño del sistema que se deseaba desarrollar. Ésta distinguía una serie de etapas:
 - Dividir el sistema en bloques para hacer la elección de los componentes de acuerdo a éstos. Imponer una serie de requisitos de los que dependerán directamente los componentes.
 - Realizar la captura del esquemático correspondiente a los distintos bloques en los que se subdivide el sistema.
 - Transformar esta captura de esquemático en un diseño físico atendiendo a las recomendaciones de compatibilidad electromagnética y de diseño de circuitos impresos flexibles
 - Llevar a cabo la fabricación real del diseño propuesto.
- Se ha programado satisfactoriamente el microcontrolador para que realizase la transformación de los datos analógicos adquiridos y en datos enviados por comunicación CAN.
- Se ha validado el sistema en implementación real, comprobando que satisfacía los requisitos funcionales.
- Finalmente, se ha realizado la documentación de todo el proceso seguido, detallando de forma exhaustiva los distintos pasos seguidos así como el razonamiento aplicado en toda la metodología.

Con todo esto, se puede afirmar que los objetivos marcados en el capítulo 1 han sido logrados de forma satisfactoria, así como el aprendizaje personal que se suponía alcanzar tras la elaboración de este trabajo fin de grado

8.2 Posibles trabajos futuros

Como posibles trabajos futuros, en lo que al sistema se refiere, se podría hacer un estudio de fiabilidad (*safety*), para poder asegurar un tiempo el tiempo de vida del sistema.

Además ya que el sistema cumple con la normativa RoHS y el diseño está desarrollado siguiendo directrices de compatibilidad electromagnética, un posible desarrollo futuro es el de hacer ensayos de inmunidad o emisión, entre otros, con el objetivo de que pueda ser comercializado (marcado CE).

Otro desarrollo posible es el de diseñar una tarjeta que incluya todo los elementos que se integran en este sistema, es decir, una tarjeta que lleve incorporado los sensores descrito.

Con respecto a la tecnología flexible descrita en éste trabajo de fin de grado, como ya se ha explicado, las posibilidades son infinitas, ya que es una tecnología en constante evolución que puede abarcar innumerables sectores.

Referencias

- [1] Centroteartigos©2012-2014.” Estándares de la industria de circuitos flexibles y especificaciones”. Disponible en: http://centroteartigos.com/articulos-enciclopedicos/article_87361.html/ (Acceso en 12 de Junio de 2014)
- [2] Cleo Brunetti; Roger W Curtis “Printed circuit techniques” Washington, D.C., U.S. Govt. Print. Off., 1947.
- [3] Xavier Angles “Materiales base para circuitos impresos”, Seminario Labcircuits, Mayo 2014.
- [4] Teledyne Electronic Technology, “Flexible Circuit Design Guide”, fourth edition.
- [5] David G. T, “técnica de producción de circuitos sobre plástico flexible”, 9 Noviembre del 2012
- [6] Fundacio URV. Disponible en: http://www.fundacio.urv.cat/media/upload/arxiu/Ofertes_Tecnologiques/screen_printed_cast.pdf/ (Acceso en 12 de Junio de 2014).
- [7] John Rufiange, “Cut & Paste Printed Resistors and Capacitors”. Disponible en: http://www.us-tech.com/RelId/740612/ISvars/default/Cut_&_Paste_Printed_Resistors_and_Capacitors.htm / (Acceso en 12 de Junio de 2014).
- [8] José L. Pons, “Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons”, Wiley
- [9] Tyndall National Institute University College Cork, “Novel Smart Sensor Glove for Arthritis Rehabilitation”. Disponible en: <http://www.im-clever.eu/publications/publications/pdfs/conferencereference.2013-05-30.5022160416.pdf/> (Acceso en 12 de Junio de 2014)
- [10] RoHS Directive 2011/65/EU (RoHS 2) Directiva 2002/95/CE (RoHS) - Restricción de Sustancias Peligrosas
- [11] Joan Pere. “EMC Compatibilidad Electromagnética”, Marcombo, primera edición, pág. 199-249
- [12] ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES ®, “IPC-7351, Generic Requirements for Surface Mount Design and Land Pattern Standard”, Febrero 2005.
- [13] ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES ®, “IPC-2223 Sectional Design Standard for Flexible Printed Boards”, Noviembre 1998.



- [14] ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES ®, “IPC-2221, *Generic Standard on Printed Board Design*”, Enero 2000.
- [15] David L. Jones, “*PCB Design Tutorial*”, Revisión A – 29 de Junio de 2004.
- [16] Minco ©, “*Flex Circuits Design Guide*”, 2007.
- [17] Joan Pere, “*Compatibilidad electromagnética y seguridad funciona en sistemas electronicos*”, MARCOMBO, pag. 125-160
- [18] Miguel J. García Martínez: “*Desarrollo de un Sistema basado en DSPIC para el Control de un Convertidor de Potencia*”, Trabajo de Fin de Grado 2013, Universidad Carlos III de Madrid.

Anexos

Anexo1: Hoja de datos STM32F103C8T6



STM32F103C8T6.pdf

Anexo2: Descripción de pines STM32F103C8T6



LQFP48	NOMBRE DEL PIN	TIPO	I/O LEVEL	MAIN FUNCTION	DEFAULT	REMAP	UTILIZACION
1	V _{BAT}	S		V _{BAT}			
2	PC13-TAMPER-RTC(5)	I/O		PC13	TAMPER-RTC		
3	PC14-OSC32_IN	I/O		PC14	OSC32_IN		
4	PC14-OSC32_OT	I/O		PC15	OSC32_OUT		
5	OSC_IN	I		OSC_IN		PD0	Oscilador patilla 2
6	OSC_OUT	O		OSC_OUT		PD1	Oscilador patilla 1
7	NRST	I/O		NRST			
8	V _{SSA}	S		V _{SSA}			GND
9	V _{DDA}	S		V _{DDA}			Alimentación 3V3
10	PA0-WKUP	I/O		PA0	WKUP/USART2_CTS/ADC12_IN0/TIM2_CH1_ETR		Entrada divisor de tensión 1
11	PA1	I/O		PA1	USART2_RST/ADC12_IN1/TIM2_CH2		Entrada divisor de tensión 2
12	PA2	I/O		PA2	USART2_TX/ADC12_IN2/TIM2_CH3		Entrada divisor de tensión 3
13	PA3	I/O		PA3	USART2_RX/ADC12_IN3/TIM2_CH4		
14	PA4	I/O		PA4	SPI1_NSS/USART2_CK/ADC12_IN4		
15	PA5	I/O		PA5	SPI1_SCK/ADC12_IN5		
16	PA6	I/O		PA6	SPI1_MISO/ADC12_IN6/TIM3_CH1	TIM1_BKIN	
17	PA7	I/O		PA7	SPI1_MOSI/ADC12_IN7/TIM3_CH2	TIM1_CH1N	
18	PB0	I/O		PB0	ADC12_IN8/TIM3_CH3	TIM1_CH2N	
19	PB1	I/O		PB1	ADC12_IN9/TIM3_CH4	TIM1_CH3N	
20	PB2	I/O	FT	PB2/BOOT1			
21	PB10	I/O	FT	PB10	I2C2_SCL/USART3_TX	TIM2_CH3	
22	PB11	I/O	FT	PB11	I2C2_SDA/USART3_RX	TIM2_CH4	
23	V _{SS_1}	S		V _{SS_1}			GND
24	V _{DD_1}	S		V _{DD_1}			Alimentación 3V3
25	PB12	I/O	FT	PB12	SPI2_NSS/I2C2_SMBAI/USART3_CK/TIM1_BKIN		
26	PB13	I/O	FT	PB13	SPI2_SCK/USART3_CTS/TIM1_CH1N		
27	PB14	I/O	FT	PB14	SPI2_MISO/USART3_RTS/TIM1_CH2N		
28	PB15	I/O	FT	PB15	SPI2_MOSI/TIM1_CH3N		
29	PA8	I/O	FT	PA8	USART1_CK/TIM1_CH1/MCO		
30	PA9	I/O	FT	PA8	USART1_TX/TIM1_CH2		
31	PA10	I/O	FT	PA10	USART1_RX/TIM1_CH3		
32	PA11	I/O	FT	PA11	USART1_CTS/CANRX/USBDM/TIM1_CH4		Recepción CAN
33	PA12	I/O	FT	PA12	USART1_RTS/CANTX/USBDP/TIM1_ETR		Transmisión CAN
34	PA13	I/O	FT	JTMS/SWIO		PA13	Programación
35	V _{SS_2}	S		V _{SS_2}			GND
36	V _{DD_2}	S		V _{DD_2}			Alimentación 3V3
37	PA14	I/O	FT	JTCK/SWCLK		PA14	Programación
38	PA15	I/O	FT	JTDI		TIM2_CH1_ETR/PA15/SPI1_NSS	
39	PB3	I/O	FT	JTDO		TIM2_CH2/PB3/TRACESWO/SPI1_SCK	
40	PB4	I/O	FT	JNTRST		TIM3_CH1/PB4/SPI1_MISO	
41	PB5	I/O		PB5	I2C1_SMBAI	TIM3_CH2/SPI1_MOSI	
42	PB6	I/O	FT	PB6	I2C1_SCL/TIM4_CH1	USART1_TX	
43	PB7	I/O	FT	PB7	I2C1_SDA/TIM4_CH2	USART1_RX	
44	BOOT0	I		BOOT0	86		
45	PB8	I/O	FT	PB8	TIM4_CH3	I2C1_SCL/CANRX	
46	PB9	I/O	FT	PB9	TIM4_CH4	I2C1_SDA/CANTX	
47	V _{SS_3}	S		V _{SS_3}			GND
48	V _{DD_3}	S		V _{DD_3}			Alimentación 3V3

Anexo3: Hoja de datos ABM3-8.000MHZ-D2Y-T



ABM3-8.000MHZ-D2
Y-T.pdf

Anexo4: Hoja de datos TPS71733DCKT



TPS71733DCKT.pdf

Anexo5: Hoja de datos SN65HVD230D



SN65HVD230D.pdf

Anexo6: Hoja de datos NUP2105LT1G



NUP2105LT1G.pdf

Anexo7: Esquemático



SCHEMATIC1 _
PAGE1.pdf

Anexo8: Lista de materiales

Lista de Materiales			Lista de materiales FlexPrototype_V00					
Designador	Fabricante	Part Number	Distribuidor	Cod. Distribuidor	Cantidad	Valor	Precio	Precio total
C1, C3	TDK	CGA2B2C0G1H180J050BA	FARNELL	2210766	2	18 pF	0,068 €	0,136 €
C2, C4, C8, C9, C10, C11	TDK	C1005X7R1A104K050BB	FARNELL	1844124	6	0,1uF	0,008 €	0,048 €
C5, C7	AVX	0402ZC103KAT2A	FARNELL	2332546	2	10nF	0,081 €	0,162 €
C6	TDK	C1005X5R0J105K050BB	FARNELL	2346871	1	1uF	0,014 €	0,014 €
J1, J4	Molex	502386-0270	RS ADMIDATA	660-1081	2	-	0,461 €	0,922 €
J2, J3	Molex	502386-0470	RS ADMIDATA	660-1088	2	-	0,547 €	1,094 €
R1	Vishay	CRCW04021M00FKED	RS ADMIDATA	678-8923	1	1M	0,024 €	0,024 €
R2	Vishay	CRCW0402120RFKED	RS ADMIDATA	678-8731	1	120	0,015 €	0,015 €
R3	Vishay	CRCW040218K0FKED	RS ADMIDATA	678-8854	1	18k	0,015 €	0,015 €
R4	Vishay	CRCW040210K0FKED	RS ADMIDATA	678-4697	1	10k	0,027 €	0,027 €
R5, R6	Vishay	CRCW0402130KFKED	RS ADMIDATA	678-8765	2	130K	0,027 €	0,054 €
U2	Texas Instrument	SN65HVD230D	FARNELL	1103105	1	-	2,220 €	2,220 €
U4	STMicroelectronics	STM32F103C8T6	RS ADMIDATA	402-279	1	-	5,480 €	5,480 €
U3	ON Semiconductor	NUP2105LT1G	RS ADMIDATA	464-255	1	-	0,399 €	0,399 €
X1	ABRACON	ABM3-8.000MHZ-D2Y-T	FARNELL	2101329	1	-	1,930 €	1,930 €
R7	Texas Instrument	TPS71733DCKT	FARNELL	1755491	1	-	0,790 €	0,790 €
							13,330 €	
Comentarios								



Anexo9: Archivos Gerber



FlexPrototype.rar